

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт географии Российской академии наук

На правах рукописи



Фасахов Михаил Александрович

**ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
НА ВОДОСБОРАХ ВОДОХРАНИЛИЩ В БАССЕЙНЕ РЕКИ КАМЫ**

Специальность 1.6.16 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Научный руководитель:
Доктор географических наук,
г.н.с. С.В. Ясинский

Москва 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Анализ современного состояния проблемы диффузного загрязнения водных объектов и модели формирования гидролого-геохимических процессов на их водосборах	14
1.1. Гидролого-геохимические факторы формирования диффузного загрязнения водных объектов.....	14
1.2. Методы и подходы к моделированию диффузного загрязнения водных объектов с учетом гидролого-геохимических процессов на их водосборах	28
2. Природные и хозяйственные условия водосборных бассейнов водохранилищ Камского каскада. Характеристика исходных данных.....	35
2.1. География и ландшафтная структура.....	35
2.2. Климатические условия	46
2.3. Хозяйственная деятельность	50
2.4. Исходных данные для оценки и прогноза диффузного загрязнения водных объектов с учетом гидролого-геохимических процессов на их водосборах	57
3. Анализ функционирования водохранилищ Камского каскада в нормальных и экстремальных условиях	64
3.1. Характеристика водохранилищ Камского каскада и гидрологического режима рек рассматриваемой территории.....	64
3.2. Сезонные и многолетние изменения водности и уровня режима ..	69
4. Пространственно-временная изменчивость гидролого-геохимических характеристик водохранилищ Камского каскада	84
4.1. Изменение концентраций загрязняющих веществ	84
4.2. Изменение масс загрязняющих веществ.....	93
5. Анализ гидролого-геохимических процессов на водосборах водохранилищ Камского каскада с применением модели ЛГМ-2.....	107
5.1. Методология и адаптация ландшафтно-гидрологической модели (ЛГМ-2) к условиям водосборов Камского каскада.....	107
5.2. Оценка современного диффузного загрязнения водохранилищ Камского каскада	117
5.3. Прогноз диффузного загрязнения водохранилищ Камского каскада с учетом комплексных изменений на их водосборах	124
5.4. Рекомендаций по внедрению природоохранных мероприятий.....	131
Заключение	139
Список используемой литературы	142
Приложение	157

Введение

Водохранилища Камского каскада (Камское, Воткинское, Нижнекамское) являются ключевыми элементами водохозяйственной системы Урала и Приволжья, обеспечивают гидроэнергетику, водоснабжение, судоходство и рекреацию, поэтому их исследования особенно **актуальны**. В условиях роста антропогенной нагрузки и проявлений климатической изменчивости (усиление засух, изменение режима стока) особую остроту приобретает **проблема диффузного загрязнения**. *Под ним в работе понимается поступление загрязняющих веществ в водные объекты с поверхностным и подземным стоком, формирующимся на исследуемой территории с учетом ее ландшафтной структуры и прямой антропогенной нагрузки на водосбор.*

Исследование выполнено в интересах как научного сообщества, так и органов государственного управления и хозяйствующих субъектов, ответственных за устойчивое развитие и комплексное хозяйственное освоение территории бассейна р. Камы с приоритетной целью сохранения и улучшения качества и количества водных ресурсов. Оно направлено на выявление закономерностей формирования гидролого-геохимических процессов на водосборах 3 водохранилищ бассейна р. Камы – Камского, Воткинского и Нижнекамского (общая площадь водосбора – 370 тыс. км²), обуславливающих водный и гидрохимический режим их функционирования.

Под гидролого-геохимическими процессами в работе понимается совокупность процессов формирования химического состава вод и их миграция в системе «ландшафт – водоток», что обусловлено геохимией подстилающих ландшафтов (почв, пород) и антропогенной нагрузкой на них (внесение удобрений, эмиссия поллютантов).

Река Кама и созданные в ее русле водохранилища являются главными источниками пополнения водных ресурсов р. Волги, и в значительной мере определяют работу крупнейшего в Европе Куйбышевского водохранилища.

Основные объемы воды и различных загрязняющих веществ (ЗВ) формируются на водосборах водохранилищ в периоды весеннего снеготаяния и выпадения сильных и экстремальных осадков, а через гидрографическую сеть поступают в эти водные объекты. Территория исследуемых водохранилищ представляет собой мозаику, сложенную из различных типов геосистем: лесов, сельскохозяйственных полей, урбанизированных территорий и других угодий, на которых формируются и стекают вместе со склоновым и подземным стоком различные объемы ЗВ.

Изучение диффузного загрязнения водных объектов началось еще во второй половине XX в. Можно отметить работы отечественных авторов: С.А. Михайлова (2000), Ю.С. Даценко и др. (2005), С.В. Ясинского и Ф.Н. Гурова (2006, 2018, 2023), Л.Д. Ратковича и В.Н. Маркина (2016), Н.И. Коронкевича и С.В. Долгова (2017), С.Д. Беляева (2016, 2017, 2023), А.Б. Китаева (2010, 2019, 2023), А.П. Лепихина и др. (2019, 2020, 2023, 2026), В.И. Данилова-Данильяна (2020), Ш.Р. Позднякова и С.А. Кондратьева (2022), А.Д. Тимошкина (2024), Е.А. Кашутиной, С.В. Ясинского и др. (2020, 2021, 2024, 2025); зарубежных исследователей: George M. Chesney (США, 1972), Brian J. Kronvang (Дания, 1997) и др. Моделирование стока и диффузных составляющих реализовано в международных и отечественных моделях: *SWAT* (Arnold et al., 1998), *INCA* (Whitehead et al., 2009), *ECOMAG* (Мотовилов, Гельфан, 2018), ЛГМ (Ясинский, 2018), ЛГМ-2 (Ясинский, Кашутина 2020).

Несмотря на наличие большого количества исследований, отражающих поступление и динамику отдельных ЗВ в бассейне р. Камы, в настоящее время существует **проблема**, которая заключается в отсутствии комплексного подхода, интегрирующего анализ природных условий, структуры хозяйственного освоения водосборов, многолетней динамики водности и применения математического моделирования для оценки и прогноза диффузного загрязнения.

Не все существующие зарубежные и отечественные модели учитывают бассейновый принцип управления водными ресурсами, включая режим

работы каскадов ГЭС. Это существенно снижает достоверность оценок **диффузного стока, который является переносчиком диффузного загрязнения.**

Целью диссертационного исследования является выявление закономерностей формирования гидролого-геохимических процессов на водосборах водохранилищ Камского каскада с применением ландшафтно-гидрологического моделирования.

Объект исследования: водосборы Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ как источники диффузного загрязнения.

Предмет исследования: гидролого-геохимические процессы, определяющие формирование и пространственно-временную изменчивость диффузного стока ЗВ с водосборов Камского каскада в различных гидрологических условиях.

Для реализации поставленной цели в работе решаются следующие **задачи:**

1. Выявить и картографировать ландшафтно-гидрологические условия водосборов водохранилищ бассейна р. Камы для оценки их вклада в расчеты диффузного стока;
2. Оценить функционирование водохранилищ Камского каскада в нормальных и экстремальных гидрологических условиях;
3. Проанализировать пространственно-временную изменчивость поступления загрязняющих веществ в акваторию Камских водохранилищ с расчетом удельного комбинаторного индекса загрязнения воды (УКИЗВ);
4. Выполнить расчеты диффузного загрязнения исследуемых водоемов с применением ЛГМ-2 при учете ландшафтной дифференциации и типов хозяйственного освоения, контролируемых сбросов и прямой антропогенной нагрузки на водосборы за многолетний период;
5. Дать сценарный прогноз диффузного загрязнения в условиях изменяющегося климата и антропогенной трансформации территории исследуемых водосборов;

6. Разработать научно обоснованные рекомендации по внедрению природоохранных мероприятий, направленных на сохранение качества водных ресурсов Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ в условиях усиливающейся антропогенной нагрузки на их водосборы.

Информационная база исследования.

1. Ежедневные данные о притоке, сбросе и уровне воды в водохранилищах за 2002-2022 гг., полученные из информационной системы по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России (<http://gis.vodinfo.ru/>).

2. Гидрохимические данные по 20 ЗВ в Камском, Воткинском (2005-2022 гг.) и Нижнекамском (2003-2022 гг.) водохранилищах, предоставленные Камским БВУ. Отбор проб проводился в 40 точках, расположенных от верховьев Камского до средней части Нижнекамского водохранилища.

3. Информация по сточным водам для Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ, полученная за период 2010-2022 гг. по данным сайта АИС ГМВО (2023).

4. Тематические картографические слои точечных, линейных и полигональных объектов (водные объекты, леса, пашни, луга, урбанизированные территории), карты растительного покрова (<https://www.openstreetmap.org/>), а также границы водосборов, карты почвенного покрова, содержащие информацию структуре и свойствах почв (<http://egrpr.soil.msu.ru/>), и цифровая модель рельефа SRTM (разрешение 30 м).

5. Статистические данные о хозяйственной деятельности (площади пахотных земель, урбанизированных территорий, поголовье скота, численности населения и др.), полученные по данным Росстата (ЕМИСС) по субъектам РФ в пределах водосборного бассейна водохранилищ Камского каскада.

Методы исследования. Среди существующих моделей (*SWAT*, *INCA*, *ECOMAG*) для решения поставленных задач расчёта выноса загрязняющих веществ с учётом ландшафтной неоднородности территории водосборов

водохранилищ Камского каскада была выбрана ландшафтно-гидрологическая модель (ЛГМ-2), разработанная в ИГ РАН (Ясинский, Кашутина, 2020) в комплексе учитывающая антропогенную трансформацию бассейнов водохранилищ и климатическую изменчивость.

В отличие от моделей, где блок качества воды требует сложной калибровки под конкретные ЗВ (например, *ECOMAG*), ЛГМ-2 изначально ориентирована на оценку диффузного стока БВ. Ее блочная структура позволяет напрямую интегрировать данные о структуре угодий, поголовье скота и внесении удобрений с разработанным ГИС-обеспечением, что делает модель наиболее адаптированной для условий бассейна с его мозаичной структурой землепользования и необходимостью учета региональной специфики хозяйственной деятельности.

Также в работе применялись географо-гидрологический, аналитический и статистический методы, ГИС-анализ (*QGIS* и *ArcGIS*) ландшафтной структуры и землепользования территории, сценарный анализ (изменение климата, интенсификация антропогенного освоения бассейнов).

Научная новизна работы.

1. **Предложена методика учета вклада хозяйственной деятельности** регионов в диффузное загрязнение территории водосборов при ландшафтно-гидрологическом моделировании.

2. **Впервые для водосборов Камского каскада** проведена комплексная оценка диффузного загрязнения с применением ЛГМ-2, адаптированной с учётом региональной специфики ландшафтной структуры, почвенно-геохимических условий и типов хозяйственного освоения (сельскохозяйственное, селитебное, промышленное);

3. **Выявлены закономерности** усиления диффузного загрязнения в экстремальные по водности годы, обусловленные снижением разбавляющей способности водных объектов при сохранении или росте абсолютного выноса загрязняющих веществ с их водосборов;

4. Разработан **методический подход к прогнозу диффузного загрязнения** на основе сценариев изменения климата и хозяйственной деятельности, интегрированный в модель ЛГМ-2, что позволяет оценивать эффективность природоохранных мероприятий.

Положения, выносимые на защиту:

1. Расчеты УК ИЗВ за годы разной водности позволили отнести водные ресурсы камских водохранилищ к «загрязненным» и «слабо загрязненным». Выявлена закономерность: высокий уровень загрязнения вод биогенными элементами обеспечивается сменой доминирующих источников их поступления – диффузного смыва с сельскохозяйственных угодий в многоводные годы и точечных коммунальных сбросов в маловодные.

2. Модель ЛГМ-2, адаптированная к условиям водосборов водохранилищ Камского каскада, позволяет оценивать пространственно-временную динамику выноса биогенных веществ, учитывая ландшафтную дифференциацию и типы хозяйственного освоения. Расчёты по модели показывают, что основными источниками поступления азота и фосфора являются лесные угодья (53% и 57% соответственно, Камское водохранилище) и сельскохозяйственные ландшафты (77% и 74% соответственно, Нижнекамское водохранилище), при этом их доминирование не зависит от водности года.

3. Сравнение ландшафтного диффузного стока, прямой антропогенной нагрузки на водосбор и контролируемых сбросов выявило пространственную дифференциацию источников загрязнения исследуемых водохранилищ: преимущественную ландшафтную нагрузку (58-82% суммарного выноса) на Камском; смешанный тип с высокой динамичностью источников и доминированием промышленно-коммунальных сбросов в средние и маловодные годы (39-75%) на Воткинском; смешанный тип с преобладанием ландшафтного выноса в средние и многоводные годы (47-53%) и прямой антропогенной нагрузки (49-61%) в маловодные годы на Нижнекамском водохранилищах.

4. Сценарное прогнозирование по модели ЛГМ-2 (CMIP6, SSP2-4.5, SSP5-8.5) показало, что к 2050 г. масса диффузного выноса биогенов в водохранилища Камского каскада сократится: по фосфору на 0,6-2,8%, по азоту на 0,6-2,4%. Данный эффект обусловлен доминированием социально-экономических факторов: сокращение сельскохозяйственной деятельности (уменьшение поголовья скота, стабилизация площади пашни) нивелирует рост выноса, ожидаемый от увеличения водности.

Теоретическая и практическая значимость работы. Методические разработки диссертации могут найти применение в работе научных и проектных организаций. Результаты исследований могут быть востребованы при разработке «Водохозяйственного паспорта бассейна реки Камы» (КамБВУ); при формировании региональных программ по снижению диффузного загрязнения (Министерство природных ресурсов, лесного хозяйства и экологии Пермского края).

Теоретические подходы и полученные результаты, излагаемые в диссертационной работе, использованы при реализации гранта РФФ 22-17-00224 «Формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах каскадов Верхне-Волжских и Камских водохранилищ при различных сценариях землепользования и изменениях климата на их территориях».

Результаты диссертационного исследования используются при проведении занятий по курсам: «Охрана и мониторинг поверхностных вод суши», «Водохозяйственные расчеты» в Пермском государственном национальном исследовательском университете.

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

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием надёжных исходных данных, а также проведением калибровки и верификации модели на пилотных водосборах. Калибровка

ландшафтно-гидрологической модели ЛГМ-2 выполнялась на водосборах рек Кудьма (3246 км²) и Линда (1681 км²) – правого и левого притоков Чебоксарского водохранилища, которые репрезентативны для условий Волжско-Камского бассейна (лесные и сельскохозяйственные ландшафты). Верификация показала, что расхождения расчётных и измеренных концентраций биогенов на этих водосборах не превышают 12% для минерального азота и 8% для минерального фосфора (Ясинский и др., 2020). При сопоставлении интегральных годовых потоков минерального азота в замыкающем створе р. Кудьмы расхождение составило около 5% (525,5 т/год против 551 т/год по данным многолетних наблюдений). В настоящей работе также проведена верификация расчётов диффузного загрязнения путём сопоставления с официальными данными об объёмах и составе сточных вод, поступающих в водохранилища, и с фактическим содержанием загрязняющих веществ в водной массе Камских водохранилищ, зафиксированным в ходе многолетних наблюдений Камского БВУ и фоновой концентрацией химических элементов.

Основные положения работы докладывались и обсуждались на расширенном заседании лабораторий гидрологии, климатологии и отдела гляциологии (ИГ РАН). Результаты исследований докладывались и обсуждались на региональных, всероссийских и международных научных конференциях, съездах и семинарах, в том числе: 2 доклада в **2023 г.** – **Нижний Новгород:** VIII Всероссийская (национальная) научная конференция «Проблемы экологии Волжского бассейна 2023» («Волга-2023»); **2024 г.** – **Пермь:** II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Цифровая география»; **2025 г.** – **Пермь:** Всероссийская научно-практическая конференция «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов»; **2025 г.** – **Барнаул:** Международная научная конференция «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии».

Публикации. По теме диссертации имеется 12 публикаций, из них: в журналах из списка ВАК – 5 работ, в том числе в изданиях, индексируемых в *Scopus* – 2 статьи.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. В работе 161 страница, 15 рисунков, 24 таблицы и 2 приложения. Библиографический список насчитывает 124 источника, из них 23 на иностранном языке.

В первой главе приведен обзор научной литературы по проблеме диффузного загрязнения водных объектов. Рассмотрены гидролого-геохимические факторы формирования диффузного загрязнения, включая природную и антропогенную составляющие, классификацию источников загрязнения (точечные и неточечные), а также особенности поступления биогенных элементов с сельскохозяйственных, урбанизированных и промышленных территорий. Выполнен анализ отечественных и зарубежных методов моделирования диффузного загрязнения, дана сравнительная характеристика моделей *SWAT*, *MODFLOW*, *HSPF*, *ECOMAG*, ЛГМ-2 и др. Обоснован выбор ландшафтно-гидрологической модели ЛГМ-2 для оценки диффузного стока биогенных веществ с водосборов Камского каскада.

Вторая глава посвящена характеристике природных и хозяйственных условий водосборных бассейнов Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ. Описаны географическое положение, рельеф, геологическое строение, почвенный и растительный покров, гидрографическая сеть. Проанализированы климатические условия, включая температурный режим, снегозапасы, промерзание почв. Детально рассмотрена хозяйственная деятельность: сельское хозяйство (площади пашни, внесение удобрений, животноводство), промышленный комплекс, урбанизированные территории и добыча полезных ископаемых. Приведена характеристика исходных данных: гидрологических (ежедневные приток, сброс, уровни воды), гидрохимических (17 ЗВ в 40 точках), данных о сточных водах, картографических материалов (*SRTM*, *OpenStreetMap*, почвенная карта) и статистических показателей (ЕМИСС, Росстат).

Третья глава посвящена анализу функционирования водохранилищ Камского каскада в нормальных и экстремальных гидрологических условиях с учетом особенностей их функционирования. Камское водохранилище является регулятором каскада, Воткинское – сопряженным звеном, а Нижнекамское работает в транзитном режиме. Рассмотрены сезонные и многолетние изменения водности и уровня режима, включая фазы весеннего наполнения, летне-осенней стабилизации и зимней сработки. Выполнен анализ внутригодового распределения притока и расхода воды для среднего по водности (2014 г.), многоводных (2017, 2019 гг.) и маловодного (2021 г.) годов.

В четвертой главе проанализирована пространственно-временная изменчивость гидролого-геохимических характеристик водохранилищ Камского каскада. Рассмотрены изменения концентраций загрязняющих веществ (аммоний-ион, нитраты, нитриты, фосфаты, железо общее) по сезонам и по длине каскада. Выполнен расчет масс загрязняющих веществ в водохранилищах (по 17 показателям) для лет разной водности. Проведена комплексная оценка качества воды с использованием удельного комбинаторного индекса загрязнения воды (УКИЗВ). Показано, что качество воды во всех водохранилищах стабильно не соответствует рыбохозяйственным нормативам, при этом выявлен компенсационный механизм: в многоводные годы доминирует диффузный смыв, в маловодные – точечные сбросы.

В пятой главе представлены результаты анализа гидролого-геохимических процессов на водосборах водохранилищ Камского каскада с применением ландшафтно-гидрологической модели ЛГМ-2. Изложена методология и адаптация модели к условиям исследуемых водосборов, включая разработку ГИС-обеспечения и методику пространственной привязки статистических данных. Выполнена оценка современного диффузного загрязнения: рассчитан вынос азота и фосфора по типам ландшафтов (пашня, сельхозугодья с уплотненной почвой, леса, ОБС, урбанизированные территории) для лет разной водности. Проведено сравнение вклада диффузного стока, точечных сбросов и прямой антропогенной нагрузки. Выполнен прогноз диффузного загрязнения до 2050 г. по сценариям *SSP2-4.5* и *SSP5-8.5* (CMIP6), показавший сокращение

выноса биогенов на 0,6–2,8% за счет доминирования социально-экономических факторов над климатическими. Разработаны рекомендации по внедрению природоохранных мероприятий, включая создание буферных зон, точное земледелие, зеленую инфраструктуру в городах и локальные очистные сооружения в сельской местности.

В заключении приведены основные результаты исследования, сформулированные в виде шести ключевых выводов, соответствующих поставленным задачам: выявлены закономерности формирования гидролого-геохимических процессов; установлена дифференциация источников загрязнения по водохранилищам; выполнена адаптация и верификация модели ЛГМ-2; показан компенсационный механизм биогенного загрязнения; даны прогнозные оценки снижения выноса биогенов к 2050 г.; предложены природоподобные мероприятия по снижению диффузного загрязнения.

1. Анализ современного состояния проблемы диффузного загрязнения водных объектов и модели формирования гидролого-геохимических процессов на их водосборах

1.1. Гидролого-геохимические факторы формирования диффузного загрязнения водных объектов

Михайлов С.А. (2000) в своей работе «Диффузное загрязнение водных экосистем» источники загрязнения водных экосистем делит на точечные и неточечные (диффузное загрязнение).

Под точечными источниками он подразумевает относительно стабильны по расходу и концентрации сбрасываемых в окружающую среду загрязняющих веществ. Диапазон, в котором могут изменяться их характеристики, меньше одного порядка величины. Количество сбрасываемых таким источником загрязнений не связано (либо связано чрезвычайно слабо) с изменением метеорологических факторов. Источники являются «идентифицируемыми точками».

Неточечные (рассеянные) источники большей частью весьма динамичны, но изменения в их характеристиках происходят через произвольные, перемежающиеся интервалы. Причем «выходные параметры» источников могут изменяться на несколько порядков величины. Величина нагрузки от диффузного загрязнения тесно связана с метеорологическими условиями, в особенности с осадками. Часто источники не могут быть идентифицированы или определены явно.

Поздняков Ш.Р. и Кондратьевым С.А. (2022) в зависимости от происхождения источника рассредоточенная нагрузка классифицировали как природная (фоновая, естественная) или диффузная (антропогенная).

Природная составляющая нагрузки формируется за счет выноса химических веществ с естественных ландшафтов (лесов, болот, лугов

естественного происхождения и др.) и части выноса с обрабатываемых земель, который происходит независимо от хозяйственной деятельности.

Диффузная составляющая нагрузки представляет собой рассредоточенный вынос с водосборных территорий растворенных и взвешенных примесей антропогенного происхождения. К числу диффузных источников относятся сельскохозяйственные угодья, пашни, пастбища, удобряемые и заброшенные площади, свалки, селитебные площади, стоки с которых не попадают на очистные сооружения.

Слабунова А.В. и Суровикина А.П. (2020) в работе «О проблеме диффузного загрязнения водных объектов» дают определение источникам диффузного загрязнения вод. Это источники, вносящие в поверхностные или подземные воды загрязняющие вещества, микроорганизмы или тепло части водосбора, измененное под влиянием хозяйственной деятельности, неорганизованным путем.

Ясинский С.В. и Гуров Ф.Н. (2006) в своей работе «Метод оценки характеристик диффузного загрязнения малых рек на основе ландшафтно-гидрологического подхода (на примере р. Истры)» под диффузным загрязнением понимают сложнейший процесс, обусловленный совокупностью многих частных гидрологических и геохимических процессов, формирующихся на водосборах водных объектов. Диффузное загрязнение водных объектов – вынос загрязняющих веществ с мозаично расположенных на водосборе источников загрязнения и их трансформация в овражно-балочной и речной сети в результате формирования на его территории гидролого-геохимических процессов.

Оценкой загрязнения, поступающего диффузным путем в разных формах (растворенных и на взвесах) с территории крупного промышленного центра Волжского бассейна Нижнего Новгорода, занимались Кашутина Е.А., Ясинский С.В. и Сидорова М.В. (2021) в своей работе «Диффузное загрязнение водных объектов на территории большого города». На основе данных собственных полевых работ они рассмотрели диффузный перенос

загрязняющих веществ с территории крупного города. Учтено, что перенос загрязняющих веществ в водной среде осуществляется в разных формах (растворенных, со взвесями разной крупности). Было выяснено, что для Нижнего Новгорода характерно повышенное по сравнению с предельно допустимыми для живых организмов концентрациями (ПДК) содержание алюминия, цинка, железа, марганца, меди, нефтепродуктов веществ, переносимых в основном со взвесями. В городском снеге, отобранном рядом с дорогой, отмечено 100 кратное превышение ПДК по алюминию и по железу, 36 кратное по цинку. Очень сильно загрязнен этими веществами талый поверхностный склоновый сток 50100 ПДК по алюминию, нефтепродуктами и железу. Через ливневую канализацию и напрямую склоновый сток попадает в реки, а через утечки в ливневой канализации загрязняет подземные воды.

Обоснованием актуальности проблемы диффузного загрязнения водных объектов, формирующегося на водосборной площади с сельскохозяйственных полей, и выявление роли диффузных источников в формировании общего биогенного загрязнения водных объектов занимались Слабунова А.В. и Суровикина А.П. (2020) в своей работе «О проблеме диффузного загрязнения водных объектов». Было определено понятие «источники диффузного загрязнения вод». Приведена классификация источников диффузного загрязнения потенциально управляемые и неуправляемые. Рассмотрена общая схема диффузного загрязнения водных объектов с сельскохозяйственных угодий, показывающая пути поступления загрязняющих веществ (поллютантов) в водный объект. По данным отечественных авторов рассмотрен вклад диффузного загрязнения в формирование общего биогенного загрязнения для водосборов малых рек, который оказался весьма значительным, что подчеркивает актуальность проблемы диффузного загрязнения водных объектов и острую необходимость ее решения на законодательном уровне. Приведен пример борьбы с диффузным загрязнением водных объектов на законодательном уровне из зарубежного опыта; показано, что в общем плане водная политика США направлена на

контроль того, превышают ли на рассматриваемой территории суммы сбросов из рассеянных и точечных источников установленные нормативы. Проанализирована Единая система государственного экологического мониторинга (государственного мониторинга окружающей среды), созданная с целью обеспечения охраны окружающей среды в России. Проведен обзор состояния системы нормативных документов, которые могут иметь отношение к управлению диффузным стоком, в результате которого выявлено, что к настоящему времени в России источники диффузного загрязнения находятся вне системы мониторинга, контроля и водоохраны.

В работе Ратковича Л.Д., Маркина В.Н., Глазунова И.В., Соколова С. А. (2016) «Факторы влияния диффузного загрязнения на водные объекты» исследуются факторы диффузного загрязнения водных объектов. Дана классификация источников загрязнения водных объектов. Классифицированы факторы загрязнения диффузионных стоков с сельхозугодий и режим вымывания веществ из почвы. Сделан аналитический обзор влияния сельскохозяйственных угодий на загрязнение водных объектов путем выделения причинно-следственных связей. Приведена зависимость водообмена между почвенными и грунтовыми водами при изменении глубины залегания грунтовых вод. Получены примеры зависимости изменения водообмена на нетронутых, орошаемых и осушаемых землях. Анализируется вынос загрязнений в зависимости от вида сельскохозяйственного использования и урожайности. Предложена методика оценки объема диффузных стоков с сельхозугодий. Показана схема мероприятий по снижению загрязнения водных объектов диффузионными стоками с сельскохозяйственных угодий. Рассмотрена методика оценки эффективности водоохраных мероприятий на основе сопоставления коэффициентов предельного загрязнения. Представлена блок-схема использования программного комплекса для расчета диффузного загрязнения с сельскохозяйственных земель. Показаны результаты модельных экспериментов применительно к речному бассейну реки Каруп в Дании. Река

Каруп является жизненно важной артерией для сельскохозяйственных районов. В долине р. Каруп расположено множество сельхозугодий, мелиорация которых осуществляется с использованием речного стока. Иллюстрируется распределение концентраций загрязняющих веществ в корневом слое, зоне аэрации и зоне насыщения рассматриваемого участка. Сформулированы направления дальнейших исследований.

Сделали обобщение российского и зарубежного опыта моделирования диффузного стока и процессов миграции в водосборном бассейне почвенных частиц и химических соединений в результате влияния талых и ливневых вод Манжина С.А. и Матвиенко А.О. (2020) в своей работе «Российский и зарубежный опыт компьютерного моделирования диффузного стока и его последствий». Авторами проведен анализ основных средств компьютерного моделирования поверхностного стока вод, водной эрозии почв и их последствий. Отмечено, что наибольшее распространение получили имитационные и аналитические средства моделирования. Большинство программных продуктов, наиболее широко используемых в настоящее время в целях изучения и моделирования поверхностного стока с водосборного бассейна, основаны на использовании инструментария имитационного моделирования и включают в себя базу данных, сформированную в результате многолетних наблюдений. Такие программы представлены как в виде продуктов, находящихся в свободном доступе, так и в виде коммерческих версий.

Поздняковым Ш.Р. и Кондратьевым С.А. (2022) рассмотрены возможности математического моделирования при решении задачи оценки вклада диффузной биогенной нагрузки со стороны водосбора в общее поступление азота и фосфора в крупные водоемы различного трофического состояния. В результате расчетов было показано, что для Куйбышевского водохранилища, являющегося эвтрофным водоемом, вклад диффузной составляющей в общую биогенную нагрузку на водохранилище со стороны водосбора составляет 85-95% от значения суммарной нагрузки. В тоже время

для олиготрофного с отдельными чертами мезотрофии Онежского озера вклад диффузной компоненты составляет 5,6% по азоту и 9,6% по фосфору от соответствующих значений нагрузки на озеро. Представленные результаты позволяют осуществить дифференцированный подход к мероприятиям по оздоровлению водных объектов, основанный на выявлении вклада диффузной составляющей в общую нагрузку и оценке опасности интенсивного развития антропогенного эвтрофирования для конкретных водоемов.

В своей статье «Сток с водосбора как источник диффузного загрязнения рек» Коронкевич Н.И. и Долгов С.В. (2017) задались целью рассмотреть динамику склонового стока за последние десятилетия и оценить его современное воздействие на экологическое состояние в южной части Восточно-Европейской равнины. Рассмотрено формирование на водосборах рек и водоемов их диффузного загрязнения, в основном склоновым поверхностным стоком. Показано, что по сравнению с периодом исчисления нормы речного стока по Воскресенскому К.П. (1962) поверхностный склоновый сток за период половодья снизился в настоящее время от 2 раз в северной лесостепи европейской части РФ до более 10 раз в южной части степной зоны, главным образом вследствие изменения климатических условий. Если бы не сокращение площади зяблевой (осенней) пахоты, характеризующейся пониженным стоком, это уменьшение было бы еще больше. Вместе с тем увеличились поверхностный сток в теплый период года и подземный сток, как в этот период, так и во время половодья из-за улучшения условий инфильтрации из-за меньшего промерзания почв. Соответственно возросла доля теплого периода года в диффужном загрязнении рек и водоемов в значительной мере за счет поступления загрязненных склоновых подземных вод.

Конференция в Рио-де-Жанейро 1992 г. Очень большое внимание загрязнению водных ресурсов на нашей планете было уделено на конференции в Рио-де-Жанейро 1992 г.

Конференция Организации Объединённых Наций по окружающей среде и развитию, состоявшаяся в Рио-де-Жанейро в июне 1992 года (далее – Рио-92), стала переломным моментом в глобальном осознании экологического кризиса и необходимостью перехода к устойчивому развитию (<https://www.un.org/ru/documents>). Впервые на межгосударственном уровне было признано, что экологические проблемы, включая деградацию водных ресурсов, носят трансграничный и системный характер, а их решение требует интеграции экологических, экономических и социальных подходов (Повестка дня на XXI век, Рио-де-Жанейро, 1993).

Одним из ключевых документов Конференции стала «Повестка дня на XXI век», в главе 18 которой особое внимание уделено охране качества и ресурсов пресной воды. В ней прямо указывается на необходимость перехода от фрагментарного, локального мониторинга к комплексному управлению водными ресурсами на уровне речных бассейнов, с учётом взаимодействия климатических, гидрологических и антропогенных факторов (Agenda, 1992). Участники Конференции признали, что традиционные методы оценки загрязнения, основанные на точечных замерах и статистических данных, не позволяют адекватно прогнозировать долгосрочные последствия хозяйственной деятельности и изменений климата, что делает их недостаточными для выработки эффективной экологической политики (Воропаев, 2003).

Таким образом, Рио-92 сформулировала стратегическую задачу перед наукой и практикой управления водными ресурсами – разработка комплексных моделей оценки загрязнения водных объектов и их водосборных бассейнов, способных интегрировать следующие компоненты:

- глобальные климатические изменения (изменение температурного режима, режима осадков, частоты экстремальных гидрологических явлений, влияющих на разбавление/концентрацию загрязняющих веществ и их миграцию) (IPCC. Climate Change 2022);

- условия хозяйствования (интенсивность сельскохозяйственного производства, объёмы промышленных и коммунальных стоков, состояние инфраструктуры водоотведения и очистки) (Журавлева, 2020);
- трансграничные и межбассейновые процессы переноса загрязнителей (через поверхностные и подземные водные потоки, атмосферные осадки) (Конвенция по охране..., Хельсинки, 1992);
- социально-экономические и институциональные факторы (уровень экономического развития, доступ к технологиям, нормативно-правовая база, поведенческие модели населения) (Стратегия развития водной..., 2022)

Современные требования к таким моделям предполагают их динамический, пространственно-распределённый и многокомпонентный характер, с возможностью интеграции данных из различных научных дисциплин – гидрологии, гидрохимии, климатологии, почвоведения, экономики и социологии (Фролова и др., 2019). Они должны обеспечивать не только ретроспективную и текущую оценку состояния водных объектов, но и прогнозирование последствий реализации различных сценариев развития – от инерционного («business as usual») до радикально экологизированных (Аббаспур и др., 2015).

Спустя более трёх десятилетий после Рио-92 актуальность поставленных задач не только не уменьшилась, но и возросла в условиях ускоряющегося климатического кризиса и усложнения состава загрязняющих веществ (микропластик, фармацевтические остатки, пер- и полифторалкильные соединения и др.) (ЮНЕП, 2021). Водные экосистемы сегодня находятся под двойным давлением: с одной стороны – растущая антропогенная нагрузка, с другой – усиливающаяся климатическая нестабильность (Vörösmarty, 2010). В этих условиях создание и применение комплексных моделей оценки загрязнения водных объектов перестаёт быть научной опцией и становится необходимым условием обеспечения водной

безопасности, предотвращения экологических катастроф и реализации права будущих поколений на благоприятную окружающую среду (Доклад ООН, 2023).

Таким образом, Конференция в Рио-де-Жанейро 1992 г. задала вектор развития современной гидроэкологической науки – от реактивного реагирования на последствия к проактивному, научно обоснованному управлению водными системами на основе комплексного моделирования. Реализация этого императива в современных условиях является ключевым фактором обеспечения устойчивого развития, глобальной экологической безопасности и межпоколенческой справедливости (Киселев, 2012).

Факторы формирования. Загрязняющие вещества могут попадать в водные объекты стоком с водосборных территорий. Следовательно, практически любая деятельность человека на водосборе создает предпосылки диффузного загрязнения.

Более распространенной и общепринятой считается типизация, когда все многообразие неточечных источников, обусловленное различием видов хозяйственной деятельности на водосборе, разделяют на два типа. К первому типу относят урбанизированные территории, т.е. территории городов и крупных населенных пунктов с преобладающей долей водонепроницаемой или слабо водопроницаемой поверхности (асфальтовые и бетонные покрытия, плотная застройка) и развитыми системами ливневой канализации. Внегородские территории, на значительной части которых инфильтрационные свойства поверхности близки к естественным (природным), относят ко второму типу рассредоточенных источников.

Среди последних особо выделяют сельскохозяйственные территории, поскольку общепризнанно, что именно интенсификация сельского хозяйства стала одной из главных причин превращения неурбанизированных территорий в источники диффузного загрязнения (Михайлов, 2000).

Специфика диффузного загрязнения и набор действующих факторов должны определяться на основе типизации источников загрязнения по видам

хозяйственной деятельности. Такая типизация является наиболее естественной и практически значимой с точки зрения выделения источников загрязнения, а также наблюдения и контроля за потоками ЗВ. Ниже перечислены основные по своему вкладу в диффузное загрязнение вод виды хозяйственной деятельности (наиболее существенные и характерные, но не все) с указанием инициируемых ими процессов и явлений.

Сельское хозяйство (земледелие, животноводство, переработка с/х продукции): эрозия пахотных земель; грунтовые воды, с растворенными удобрениями и пестицидами; орошаемые и осушаемые угодья; навозохранилища и буртовые площадки; места выгула животных и складирования отходов переработки; рыбопродукционные пруды.

Городское хозяйство (урбанизированные территории, включая города, поселки, пригородные зоны и селитебные земли): поверхностный сток с застроенных территорий; загрязненные грунтовые воды жилой застройки и полигонов ТБО; поверхностный сток с вновь осваиваемых территорий при строительстве, прокладке коммуникаций и проч.

Транспорт (включая судоходство и трубопроводы): поверхностный сток с автомагистралей; выхлопные газы и продукты истирания дорог и механических частей; места аварийных ситуаций; несанкционированный сброс подсланевых вод, утечки ГСМ с судов; поверхностный сток с аэродромов, портов, стоянок автотехники (Данилов-Данильян, 2020).

Промышленное производство и добыча природных ресурсов и энергетика: загрязненные атмосферные осадки и грунтовые воды; отвалы горных пород и промышленных отходов; поверхностный сток с промышленных площадок; хранилища жидких и твердых производственных отходов; территории лесозаготовительных предприятий; шахтные и карьерные воды; места добычи нерудных материалов на ложе водного объекта.

Рекреационное водопользование: места организации несанкционированных свалок, кострищ, туалетов, мойки автомобилей; места

любительского рыболовства; использование маломерного флота и водный туризм; стоянки автотранспорта на берегу и акватории водного объекта (в т.ч. на льду).

Переработка берегов, строительные и дночерпательные работы: места стоянки автоспецтехники, склады строительных материалов, ГСМ; участки русла и берега при строительстве мостов, переходов, прокладке трубопроводов; берега, подверженные эрозии; участки акватории в местах производства дноуглубительных работ, донные отложения (Данилов-Данильян, 2020).

Сельскохозяйственные территории. Пути поступления загрязнений в водные объекты и источники таких загрязнений при сельскохозяйственной деятельности весьма разнообразны. Агропромышленный комплекс (АПК) в этом отношении является своеобразным конгломератом точечных и неточечных источников, которые во многих отношениях трудно поддаются контролю, даже в условиях ведения вполне контролируемой деятельности. Точечные источники загрязнения в АПК образуются преимущественно на объектах коммунального хозяйства сельских поселений, животноводческих и птицеводческих комплексах, в тепличных хозяйствах, производственной структуре сельскохозяйственного производства, на осушительных и оросительных системах. Неточечные источники формируются за счет поверхностного стока с сельскохозяйственных полей, включая орошаемые и осушаемые земли, территорий животноводческих комплексов и сельских поселений. Под неконтролируемыми точечными источниками загрязнения водных объектов сельским хозяйством понимаются такие сельскохозяйственные объекты, на которых предусмотрены технические решения по отводу и очистке сточных вод, но ввиду разных причин объемы стоков и их загрязнение не контролируются и в водные объекты поступают стоки ненадлежащего качества (Данилов-Данильян, 2020).

С сельскохозяйственными территориями связаны два доминирующих (по объему нагрузки) вида загрязнения поверхностных вод взвешенные

вещества и элементы-биогены (азот, фосфор и др.). Подземные воды подвержены, прежде всего, загрязнению пестицидами токсичными химическими веществами, которые применяются на сельскохозяйственных площадях в составе ядохимикатов для борьбы с сорняками и насекомыми-вредителями. И это также представляет собой чрезвычайно острую экологическую проблему, поскольку именно артезианские воды практически повсеместно используются для водоснабжения населенных пунктов (Михайлов, 2000).

Урбанизированные территории. Выделение городских территорий в особый тип неточечных источников обусловлено следующими соображениями. Во-первых, города, как территории с большой плотностью населения, развитой промышленностью и интенсивной хозяйственной деятельностью, дают значительные по объему нагрузки на близлежащие водные объекты (реки, эстуарии, прибрежные воды), причем спектр загрязняющих веществ от мегаполисов, как правило, является несравненно более широким, чем от территорий не урбанизированных.

Во-вторых, для застроенных и благоустроенных территорий городов характерна значительная доля водонепроницаемой поверхности, что по мере строительства канализационных сооружений создает на них совершенно особые гидрологические условия. Главной чертой последних является ускоренное формирование поверхностного стока при выпадении дождей или в процессе таяния снега. Мойка улиц и дорожных покрытий в условиях развитой системы ливневой канализации также даст дополнительную нагрузку на водные экосистемы. Поверхностный сток с городских территорий выносит в водоемы до 40% общей нагрузки на них по органическим и минеральным веществам.

Наконец, в-третьих, водные объекты, подвергающиеся такому комплексному воздействию, часто непосредственно используются населением этих городов в самых разных целях от водоснабжения до рекреации, что в случае опасного выброса загрязняющих веществ может сказаться на здоровье

сразу большого числа людей. Этим и объясняется то пристальное внимание, которое уделяется во всем мире изучению дренажного стока с городских территорий (Михайлов, 2000).

Транспорт. В связи с быстрым развитием автотранспорта, большим числом и сильной токсичностью веществ, содержащихся в выхлопе автомобильных двигателей, загрязнение окружающей среды автотранспортом представляет собой особую опасность.

В отработанных газах автомобилей насчитывается более 200 химических соединений, в т.ч. такие опасные для здоровья человека, как окись углерода, окислы азота, различные углеводороды. Бензиновые двигатели, кроме того, выделяют продукты, содержащие металлы, хлор, бром, а дизельные значительное количество сажи, частичек копоти ультрамикроскопических размеров. Входящие в состав отработанных газов газообразные примеси под действием солнечного света вступают в реакции, в результате которых образуются вещества, по своей токсичности, превышающие исходные загрязнители. Накопление этих продуктов в воздухе при неблагоприятных метеорологических условиях приводит к образованию фотохимического смога и образованию ядер конденсации осадков.

К токсичным компонентам отработавших газов относятся: оксид углерода, углеводороды, оксиды азота, оксиды серы, альдегиды, сажа, бензопирен, соединения свинца (Данилов-Данильян, 2020).

Добыча полезных ископаемых. Данный вид деятельности сопровождается образованием шахтных, карьерных и рудничных вод, фильтрацией воды через отвалы горных пород и сопутствующим растворением, выносом рудных минералов, поверхностным смывом с территории предприятий и мест добычи, атмосферными выпадениями.

Поверхностный сток с территории промышленных предприятий характеризуется достаточно сложным химическим составом, который зависит от применяемых на производстве технологических процессов. Концентрация поллютантов зависит от общего санитарно-технического состояния

территории, контролем за технологическими процессами, организации хранения и транспортирования сырья, промежуточных и готовых продуктов, а также от принятой системы обращения с отходами. В случае крупных предприятий, включающих различные производства, важно понимать, что поверхностный сток по своим гидрохимическим показателям может быть неоднороден и заметно отличаться от стока с других участков и общего стока, что должно учитываться при разработке систем мониторинга, технологии очистки и схемы его отведения.

В зависимости от состава загрязнений, накапливающихся на промышленных площадках и смываемых поверхностным стоком, промышленные предприятия и отдельные их территории можно разделить на две группы.

Первая группа предприятия, сток с которых по химическому составу близок к поверхностному стоку сельтебных зон и не содержит специфических веществ с токсичными свойствами. К этой группе относятся предприятия черной металлургии (за исключением коксохимических производств), машиностроения, автомобильного транспорта, угольной промышленности и некоторых отраслей химической промышленности. Основными примесями, содержащимися в стоке с территорий предприятий этой группы, являются грубодисперсные примеси, нефтепродукты, сорбированные главным образом на взвешенных веществах, минеральные соли и органические примеси естественного происхождения. Но в отдельных случаях концентрация примесей в поверхностном стоке с территории промышленных предприятий может достигать значительных величин, в частности при сборе в ливневую сеть отработанных нефтепродуктов и других отходов производства, аварийных проливах и просыпках сырья.

Вторая группа предприятия, на которых по условиям производства не представляется возможным в полной мере исключить поступление в поверхностный сток специфических веществ с токсичными свойствами или значительных количеств органических веществ, обуславливающих высокие

значения показателей ХПК и БПК стока. Это предприятия цветной металлургии, обработки цветных металлов, коксохимического производства, бытовой химии, химической, лесохимической, целлюлозно-бумажной, нефтеперерабатывающей, нефтехимической и микробиологической промышленности, кожевенно-сырьевые и кожевенные заводы, мясокомбинаты, шпалопропиточные заводы, аэропорты, производства химической и электрохимической обработки поверхностей металлов (гальванические производства), окрасочные производства, производства синтетических моющих средств и др. (Данилов-Данильян, 2020).

1.2. Методы и подходы к моделированию диффузного загрязнения водных объектов с учетом гидролого-геохимических процессов на их водосборах

Оценка загрязнения водных объектов в условиях глобальных климатических изменений и растущей антропогенной нагрузки требует применения современных математических моделей, способных интегрировать гидрологические, гидрохимические, климатические и социально-экономические параметры. В мировой практике разработано множество моделей различного масштаба и назначения – от локальных (полевого уровня) до бассейновых и региональных систем. В данной главе проводится сравнительный анализ наиболее востребованных и научно обоснованных моделей, включая как международные (*SWAT*, *MODFLOW*, *HSPF* и др.), так и отечественные разработки (ЛГМ-2, *ECOMAG*, модель ИНЦ РАН им. Кондратьева). Особое внимание уделено их функциональным возможностям, преимуществам, ограничениям и практическим примерам применения в России и за рубежом.

Обзор зарубежных моделей оценки качества вод и диффузного загрязнения.

Модель SWAT (Soil & Water Assessment Tool).

Модель *SWAT* разработана в Сельскохозяйственной исследовательской службе Министерства сельского хозяйства США (*USDA-ARS*) под руководством доктора Джеффа Арнольда в начале 1990-х гг. Первая версия выпущена в 1994 г. на основе более ранних моделей *CREAMS* и *SWRRB* (Arnold J. G., Srinivasan R., 1998). Актуальная версия – *SWAT+* (2019) – обладает улучшенной архитектурой и гибкой структурой подключения модулей.

SWAT – полу-распределённая, физически обоснованная, непрерывная во времени модель для моделирования формирования стока, эрозии почв и переноса сельскохозяйственных загрязнителей (азот, фосфор, пестициды) в масштабе крупных речных бассейнов. Работает на дневном шаге. Предназначена для оценки долгосрочных последствий землепользования и климата.

Модель делит бассейн на подбассейны, а те – на гидротопы (*HRU – Hydrologic Response Units*) – однородные по почве, землепользованию и уклону участка.

Модель MODFLOW + MT3DMS.

MODFLOW – разработана Геологической службой США (*USGS*) в 1984 г. (первая версия), автор – доктор Стэнли А. Леаки. *MT3DMS* – разработана доктором Ченмином Чжэн в 1990-х гг. для моделирования миграции растворённых веществ. Совместное применение – стандарт для моделирования загрязнения подземных вод (Harbaugh, 2005).

MODFLOW – численная модель для трёхмерного моделирования потоков подземных вод на основе уравнения Дарси. *MT3DMS* решает уравнение адвекции-дисперсии-реакции для моделирования миграции загрязняющих веществ. *Применение*: прогноз распространения нитратов, нефтепродуктов, тяжёлых металлов в подземных водах. *Ограничения*: модель не учитывает поверхностный сток и биогеохимические процессы без дополнительных модулей, требует детальных гидрогеологических данных.

Модель HSPF (Hydrological Simulation Program – FORTRAN). Разработана Агентством по охране окружающей среды США

(USEPA). Предназначена для комплексного моделирования гидрологии и качества воды в городских и сельскохозяйственных бассейнах. Хорошо моделирует городские стоки и комбинированные системы водоотведения. *Ограничения:* требует много входных данных, сложна в калибровке, имеет устаревший интерфейс.

Модель MIKE SHE / MIKE HYDRO. Разработана компанией DHI (Дания). Это комплексная трёхмерная модель для моделирования поверхностных и подземных вод, включая испарение, почвенную влагу и качество воды. Обеспечивает полную интеграцию поверхностных и подземных вод. *Ограничения:* высокие требования к вычислительным ресурсам и исходным данным, коммерческая лицензия.

Модель SWMM (Storm Water Management Model). Разработана USEPA. Стандарт для моделирования ливневой канализации и загрязнения в городских условиях. Моделирует динамику загрязнителей в реальном времени. *Ограничения:* только городские территории, не сельских или природных бассейнов.

Отечественные модели и подходы к моделированию диффузного загрязнения.

В России разработка моделей диффузного загрязнения водных объектов имеет давнюю историю, однако долгое время они уступали зарубежным аналогам по степени детализации и программной реализации. В последние десятилетия ситуация изменилась: созданы несколько оригинальных моделей, адаптированных к специфике российских ландшафтов и климатических условий.

Модель ECOMAG (ECOLOGical Model for Applied Geosystems). Разработана в Институте водных проблем РАН (Ю.Г. Мотовилов, А.Н. Гельфан). Предназначена для моделирования водного и теплового балансов, а также переноса веществ в речных бассейнах. Модель хорошо адаптирована к условиям северных и холодных регионов, учитывает влияние многолетней мерзлоты. Интегрирована с ГИС. *Преимущества:* учёт мерзлоты, адаптация к слабоизученным территориям.

Ограничения: сложность калибровки гидрохимических параметров, меньшая детализация ландшафтной структуры.

Модель ИНЦ РАН им. Л.И. Кондратьева (для озёр и водохранилищ). Разработана в Институте озераедения РАН (С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова). Предназначена для моделирования термодинамики, гидрохимии и экосистем озёр и водохранилищ. Учитывает стратификацию, цветение водорослей, кислородный режим. *Преимущества:* специализация на стоячих водоёмах, высокая детализация внутриводоёмных процессов. *Ограничения:* не предназначена для моделирования рек и водосборов, требует большого количества параметров для калибровки.

Ландшафтно – гидрологический метод (ЛГМ-2) оценки выноса биогенных элементов в водосбор в водный объект.

Разработан в Институте географии РАН (С.В. Ясинский, Е.А. Кашутина 2006, 2018, 2020 гг.). ЛГМ-2 позволяет получить оценки поступления биогенных веществ в водный объект с учётом ландшафтной структуры и антропогенной нагрузки на водосбор.

Диффузный сток биогенных элементов с водосбора может быть описан через характерные для исследуемых угодий концентрации веществ в разных средах:

$$S_{ij} = K_j C_{ij} Y_{ij} F_i \quad (1)$$

где S_{ij} – масса БВ с j -м видом стока с i -го угодья; соответственно C_{ij} – концентрация БВ в стоке; i – вид угодья; j – вид стока: 1 – поверхностный склоновый, 2 – подповерхностный (верховодка), 3 – подземный; 4 – сток наносов (продуктов эрозии); Y_{ij} – сток (слой жидкого стока или модуль стока наносов) с i -го угодья; F_i – площадь i -го угодья на водосборе; K_j – коэффициент для согласования размерностей (Ясинский, 2018).

Значения слоёв стока (Y_{ij}) для различных ландшафтов получены на основе региональных гидрологических зависимостей и данных многолетних наблюдений на водосборах-аналогах. Концентрации биогенов (C_{ij}) задаются дифференцированно по типам угодий с учётом удельных показателей выноса:

для пашни – в зависимости от массы удобрений, для пастбищ – с учётом поголовья скота, для лесов – фоновые значения, для урбанизированных территорий – с учётом плотности населения.

Преимущества ЛГМ-2: максимальный учёт ландшафтной структуры водосборов; возможность учёта прямой антропогенной нагрузки (внесение удобрений, животноводство, неканализованное население); сравнительная простота расчётов и интерпретации результатов; адаптация к российским условиям, особенно к равнинным и заболоченным территориям.

Ограничения ЛГМ-2: вынужденное использование эмпирических зависимостей, что может снижать точность расчётов; модель не учитывает внутриводоёмные процессы трансформации биогенов (например, денитрификацию в донных отложениях); концентрации биогенов задаются как константы для каждого типа угодий, что не отражает их внутрисезонную динамику.

Сравнительная характеристика описанных и других моделей представлена в Приложении А.

Таким образом, выполнен анализ современного состояния проблемы диффузного загрязнения водных объектов и моделей формирования гидролого-геохимических процессов на их водосборах, и приведено обоснование выбора расчётной модели ЛГМ-2 для оценки диффузно стока БВ с водосборов водохранилищ Камского каскада.

Обоснование выбора модели ЛГМ-2.

Для решения поставленных в диссертации задач – оценки пространственно-временной изменчивости диффузного стока биогенных элементов с водосборов трёх водохранилищ Камского каскада и его прогноза при различных сценариях – была выбрана ландшафтно-гидрологическая модель ЛГМ-2.

Выбор обусловлен следующими причинами:

1. **Учёт ландшафтной мозаичности.** Водосборы Камского каскада характеризуются высокой пространственной неоднородностью: от

практически ненарушенных лесных массивов на водосборе Камского водохранилища до интенсивно распаханых сельскохозяйственных земель на водосборе Нижнекамского водохранилища. ЛГМ-2 позволяет дифференцированно рассчитывать сток для каждого типа угодий (лес, пашня, урбанизация, ОБС и др.).

2. **Учёт разных видов стока.** В отличие от многих зарубежных моделей, ориентированных преимущественно на поверхностный сток, ЛГМ-2 учитывает также подповерхностный (верховодку) и подземный сток, а также сток наносов (продуктов эрозии). Это особенно важно для территории с развитой овражно-балочной сетью и значительной долей грунтового питания.

3. **Прямой учёт антропогенной нагрузки.** Модель позволяет задавать внесение минеральных и органических удобрений на поля, поголовье скота, численность сельского населения (отходы жизнедеятельности). Это даёт возможность не только ретроспективно оценивать загрязнение, но и прогнозировать его изменение при различных сценариях землепользования.

4. **Адаптация к российским условиям.** Модель разработана в России (ИГ РАН) и прошла апробацию на водосборах Верхней Волги (Чебоксарское водохранилище), что подтвердило её адекватность для равнинных территорий с мозаичной структурой землепользования.

5. **Интеграция с ГИС.** В рамках диссертации было разработано автоматизированное ГИС-обеспечение модели для 3 водосборов водохранилищ, что позволило существенно ускорить и стандартизировать расчёты.

Сравнение ЛГМ-2 с другими моделями, которые могли бы быть применены для решения задач диссертации, представлено в табл. 1. Как видно из таблицы, SWAT требует сложной калибровки гидрохимических параметров и ориентирована преимущественно на сельскохозяйственные ландшафты, что затрудняет её применение на залесённых водосборах (Камское водохранилище). ЕСОМАГ хорошо работает в северных регионах, но требует больших вычислительных ресурсов и не имеет блока прямой антропогенной

нагрузки. Модель ИНЦ РАН предназначена для стоячих водоёмов, а не для водосборов. ЛГМ-2, напротив, изначально разработана для расчёта диффузного стока с водосборов и прошла успешную апробацию в бассейне Верхней Волги (Ясинский и др., 2020).

Таким образом, комплексное использование ЛГМ-2 в сочетании с ГИС-технологиями, данными государственного мониторинга, является оптимальным инструментом для достижения цели и задач диссертационного исследования.

2. Природные и хозяйственные условия водосборных бассейнов водохранилищ Камского каскада. Характеристика исходных данных

2.1. География и ландшафтная структура

Географическое положение и рельеф. Территория водосбора Нижнекамского водохранилища (рис. 1), общей площадью 370000 км², охватывает бассейн Верхней, Средней и Нижней Камы и расположена на северо-востоке Европейской части России. Протяженность с севера на юг составляет 956 км (от 61°57'с.ш. до 52°38'с.ш.), а с запада на восток – 580 км (от 51°42'в.д. до 60°25'в.д.). Крайняя северная часть бассейна расположена на территории республики Коми, западная – на территории Удмуртии, Кировской области и республики Татарстан, восточная – в Свердловской и Челябинской области, южная – на территории республики Башкортостан.

Правобережная часть водосбора находится на Русской равнине, левобережная – в предгорьях и на западном склоне Уральских гор. На севере границей водосборной площади являются Северные Увалы, которые являются водоразделом между бассейнами Северного Ледовитого океана и Каспийского моря. На востоке граница водораздела проходит по горным хребтам Урала, совпадая на большом протяжении с границей между Европой и Азией. В пределах Среднего Урала (в районе г. Ревды) Уральский хребет теряет свое водораздельное значение. Река Чусовая пересекает его, беря начало на противоположном склоне (Ресурсы ..., 1973). В южной части водораздел проходит по границе между бассейнами рек Белой и Уралом. Западная граница проходит сначала вдоль водоразделов бассейнов рек Самара и Зая, далее граница проходит вдоль крупного бассейна р. Вятки – правого притока р. Камы.

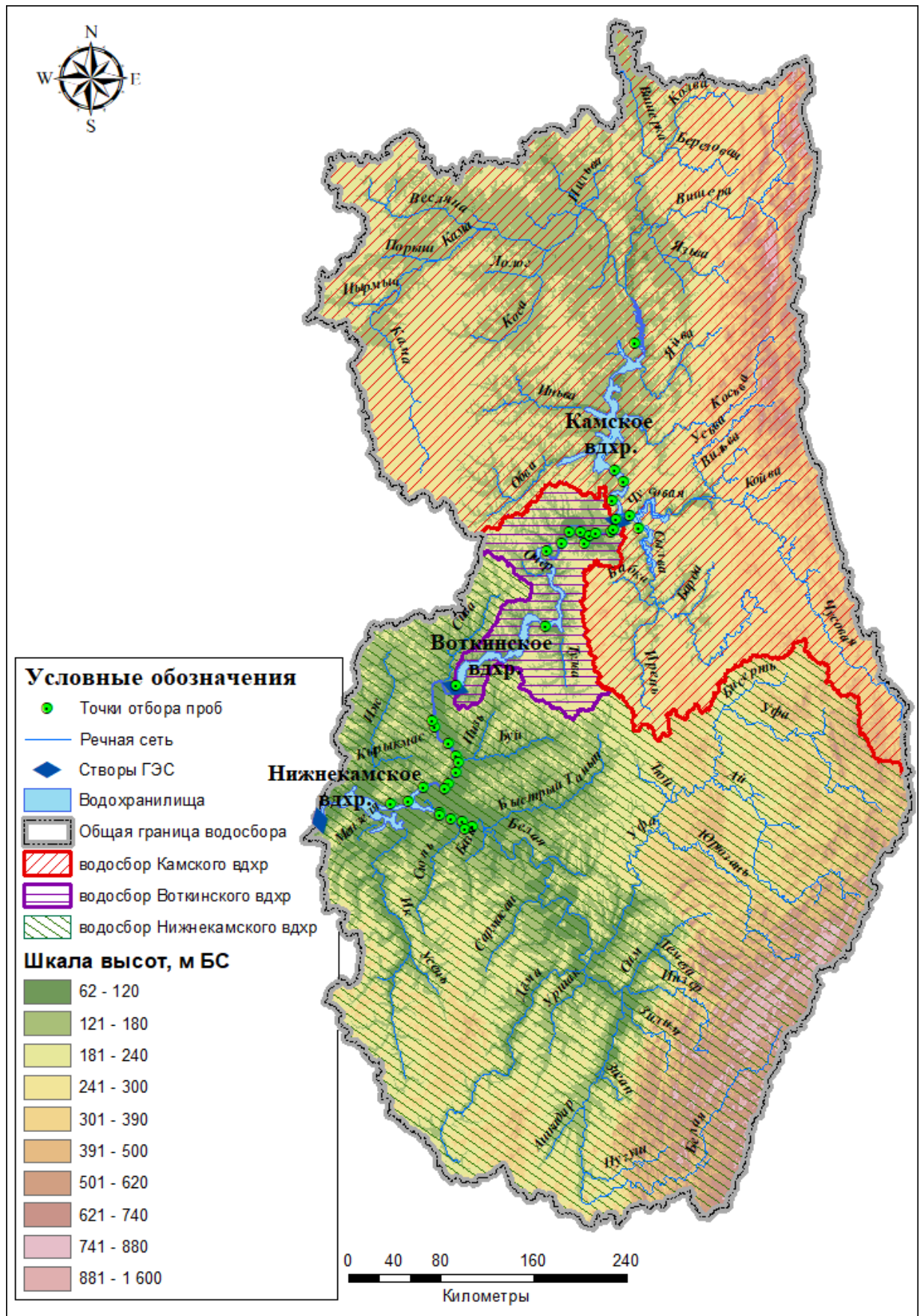


Рис. 1. Водосбор камских водохранилищ

В геоморфологическом отношении данная территория довольно хорошо изучена. Имеются работы по орографическому описанию и геоморфологическому районированию Е.В. Ястребова (1959), Г.А. Максимовича (1960) и др. Водосбор Нижнекамского водохранилища представляет собой всхолмленную равнину, повышающуюся с запада на восток, где характерной особенностью рельефа являются западные хребты Уральской горной страны (30 % общей площади). Наибольшие высоты горной части водосбора составляют 1000-1500 м БС, равнинной – 200-320 м БС ([URL: https://www.gebco.net](https://www.gebco.net)). В западной части территории, где берет свое начало р. Кама, расположена Верхне-Камская возвышенность с наиболее высокими участками (320-340 м БС) в средней ее части (Ястребов, 1959). Рельефу возвышенности свойственна слабая всхолмленность водоразделов. Для участков, прилегающих к долинам Иньвы и Обвы, а также некоторых других рек характерна значительная изрезанность. Расчленению поверхности здесь способствует то, что речная и овражная сеть развивается на сравнительно рыхлых и легко размываемых породах. Таким образом, восточная часть возвышенности отделена широкой пониженной полосой меридионального направления от основной части. К юго-востоку от Верхне-Камской возвышенности располагается Оханская возвышенность, являющаяся ее продолжением. Средняя ее высота составляет 220-240 м БС, максимальная – 316 м БС. Веслянская низменность отделяет Северные Увалы от Верхне-Камской возвышенности, высоты составляют 140-150 м БС. Переходы низменности к соседним возвышенностям постепенны, особенно к Северным Увалам. В связи со слабым дренажем и невысокими температурами лета местность сильно заболочена. К востоку низменность переходит в Предуральскую депрессию.

На территории, прилегающей к Нижнекамскому водохранилищу, выделяются Можгинская и Бугульминско-Белебеевская возвышенности со средними высотами 250-270 м БС. В южной части территории расположены Зилаирское плато и хребет Малый Нака с высотами 600-720 м БС.

Восточная часть территории водосбора Нижнекамского водохранилища расположена в Уральской горной стране. Наиболее приподнятой является северо-восточная часть. Здесь располагается среднегорный район и находятся все самые высокие хребты и вершины рассматриваемой территории высотой свыше 1000 м БС над уровнем моря. Для рельефа среднегорного района характерны многочисленные нагорные террасы, представляющие собой крупные ступени на склонах гор. Особенностью среднегорного района является резкая приподнятость его над остальной территорией. Следствием является густая и глубокая расчлененность поверхности (Чикишев, 1966). Максимальные высоты Южного Урала достигают 1100-1200 м БС. Граница водосбора проходит практически по всей длине Южного Урала и поворачивает в районе хребта Уралтау и Зилаирского плато.

Рельеф оказывает существенное влияние на условия формирования гидрологического режима водных объектов на рассматриваемой территории. В местах слабой расчлененности территория заболачивается, при сильной расчлененности, наоборот, сток становится более интенсивным.

Вследствие особенностей рельефа местность, за исключением востока, открыта для проникновения воздушных масс. Уральские горы являются заметным препятствием для проникновения воздуха из Сибири и способствуют конденсации влаги и увеличению количества осадков при движении влажных воздушных масс с запада (Дубровин и др., 1959).

В геологическом строении водосбора Нижнекамского водохранилища принимают участие архейские, протерозойские, палеозойские, мезозойские и кайнозойские образования. Все они, за исключением архейских и протерозойских, выходят на поверхность (Наливкин, 1944; Софроницкий, 1959, 1967). Исследуемая территория сложена в основном осадочными породами, а на востоке присутствуют магматические породы. Наибольшую площадь занимают породы палеозоя, особенно пермской системы. Древние породы, относящиеся к протерозойской группе, выступают на востоке. В западной части водосбора они последовательно сменяются более молодыми

отложениями вплоть до юрской системы. Все эти породы прикрыты маломощным слоем рыхлых пород кайнозойской группы, из которых повсеместно распространены четвертичные отложения.

По условиям залегания докайнозойских пород территория бассейна подразделяется с запада на восток на платформенную часть, Предуральский краевой прогиб и складчатый Урал (Максимович, 1960). Платформенная часть размещается на восточной окраине Русской платформы. Предуральский краевой прогиб характеризуется синклинальным строением и состоит из складчатого докембрийского основания и осадочного чехла. Складчатый Урал заходит на территорию бассейна лишь небольшой западной частью (Софроницкий, 1959).

На территории бассейна третичные и четвертичные отложения представлены различными породами континентального происхождения.

На территории Уральской горной страны почти повсеместно развиты осадочные породы среднего и верхнего палеозоя, среди которых преобладают песчаники, глинистые сланцы, мергели и известняки. Широко распространены в пределах района карстующие горные породы и среди них, прежде всего, – известняки каменноугольного возраста.

На территории водосбора находятся Печорская и Уфимско-соликамская карстовые области, а также Колво-Вишерский, Ксенофоновско-Ныробский, Полазненско-Шалашинский, Сылвинско-Сергинский карстовые районы (Горбунова и др., 1992). 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. Следует отметить, что если дебит обычных подземных источников во времени меняется мало, то дебит карстовых вод в отдельных районах в летне-осенний период может меняться в значительных

пределах, так как зависит от количества атмосферных осадков, уровня воды в реках, размера подземных пустот и других факторов. Поэтому влияние карста, особенно в осенний период при большом количестве атмосферных осадков, может быть очень значительным. Влияние карста испытывают реки, относящиеся к водосборам Колвы, Вишеры, Пильвы, Яйвы, Косьвы, Усьвы, Чусовой, Сылвы, Ирени и некоторых их притоков.

Почвы. На формирование почвенного покрова оказывают влияние геологическое строение, рельеф, климат и растительность территории. Согласно исследованиям Н.Я. Коротаева (1962) преобладающими на территории бассейна являются почвы подзолистого типа, которые характерны для района хвойных лесов. На их долю приходится 78% площади водосбора. Подзолистые почвы подразделяются на типичные подзолистые и дерново-подзолистые. Типичные подзолистые почвы встречаются в основном в северной части бассейна и составляют 38% всех почв территории. Дерново-подзолистые почвы развиваются под хвойными лесами с подлеском из липы, рябины, лиственных кустарников с покровом из мхов и разнотравья. Данные почвы занимают центральную и южную часть водосбора (40%).

По механическому составу почвы подразделяются на тяжелые (глинистые, суглинистые) и легкие (песчаные). На территории бассейна в основном преобладают тяжелые почвы, легкие распространены лишь на севере.

В юго-восточной части бассейна, в пределах Кунгурской лесостепи, встречаются серые лесостепные почвы, а также выщелоченные и оподзоленные черноземы. По высоким горным останцам и увалам в восточной, горной части бассейна встречаются горно-луговые почвы. В этой же части бассейна под лесами встречаются горные подзолистые и горные дерново-подзолистые почвы, а также суглинисто-каменистые почвы западного склона Урала. На водораздельных пространствах и речных террасах широко развиты покровные и лессовидные суглинки. Озеро-болотистые отложения развиты на обширных пространствах пойменной и первой

надпойменной террас. Они представлены глинами, торфяниками, сапропелями.

Растительность. Водосбор Нижнекамского водохранилища расположен в лесной зоне и основным типом растительности являются леса, которые занимают около 57% территории (ОГХ, 2015). С северо-востока на юго-запад залесенность снижается. Например, в бассейнах гидрологических постов (г/п) Кама-Бондюг и Вишера-Рябинино коэффициент лесистости составляет 0,92, в бассейнах г/п Тулва-Барда и Ирень-Шубино – 0,64 и 0,61 соответственно, а на водосборе г/п Белая-Бирск – 0,51.

Согласно исследованиям С.Ф. Николаева (1959) леса различны по своей природе: темнохвойные, светлохвойные, мелколиственные и широколиственные. Наиболее распространены темнохвойные леса (ель, пихта). Ель более распространена, чем пихта, что связано с большей требовательностью пихты к почве. От севера к югу четко проявляется влияние широтной зональности. На северо-востоке территории водосбора Воткинского водохранилища распространена кедровая сосна. В восточной части бассейна растет лиственница. На севере крупными массивами располагаются еловые и елово-пихтовые леса, местами встречаются сосна, береза, осина. Травяной покров развит слабо, почву покрывают мхи. Южная травянистая тайга начинается к югу от г. Осы. Здесь, наряду с липой, произрастают клен, вяз, иногда дуб. Болотная растительность представлена примерно на 5% территории водосбора (Николаев, 1959). Южная и юго-западная часть водосбора в основном занята луговой растительностью (45-49% от общей площади) (рис. 2).

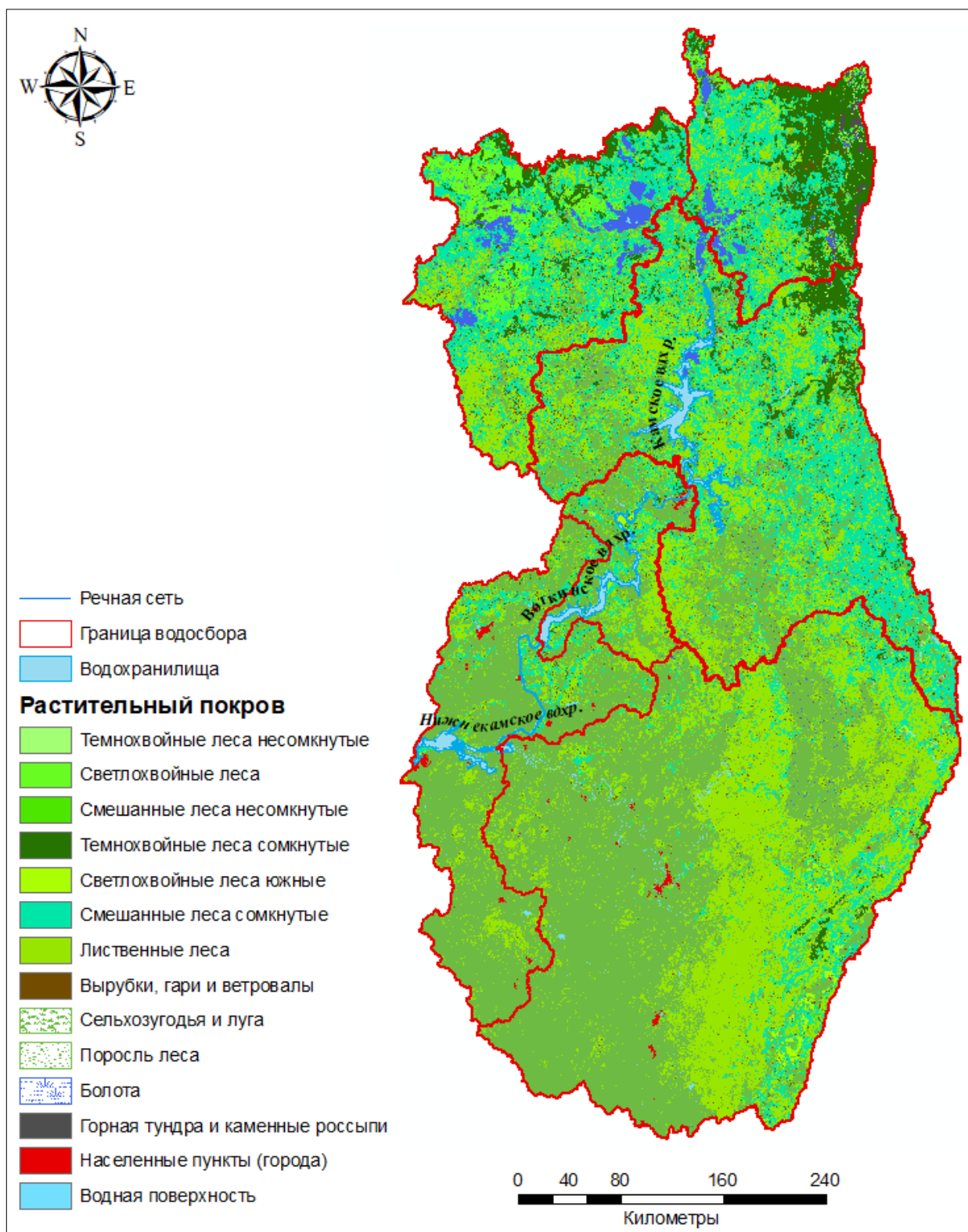


Рис. 2. Пространственное распределение растительного покрова на территории водосбора Нижнекамского водохранилища

Гидрографическая сеть водосбора Нижнекамского водохранилища представлена постоянно действующими реками (рис. 3), временными

водотоками, а также озерами, болотами, водохранилищами и прудами. Гидрографическая сеть территории развита довольно равномерно. Коэффициенты густоты речной сети изменяются с севера на юг от 0,7-0,8 до 0,2-0,3 км/км² (Матарзин, 1957; Островский, 1966).

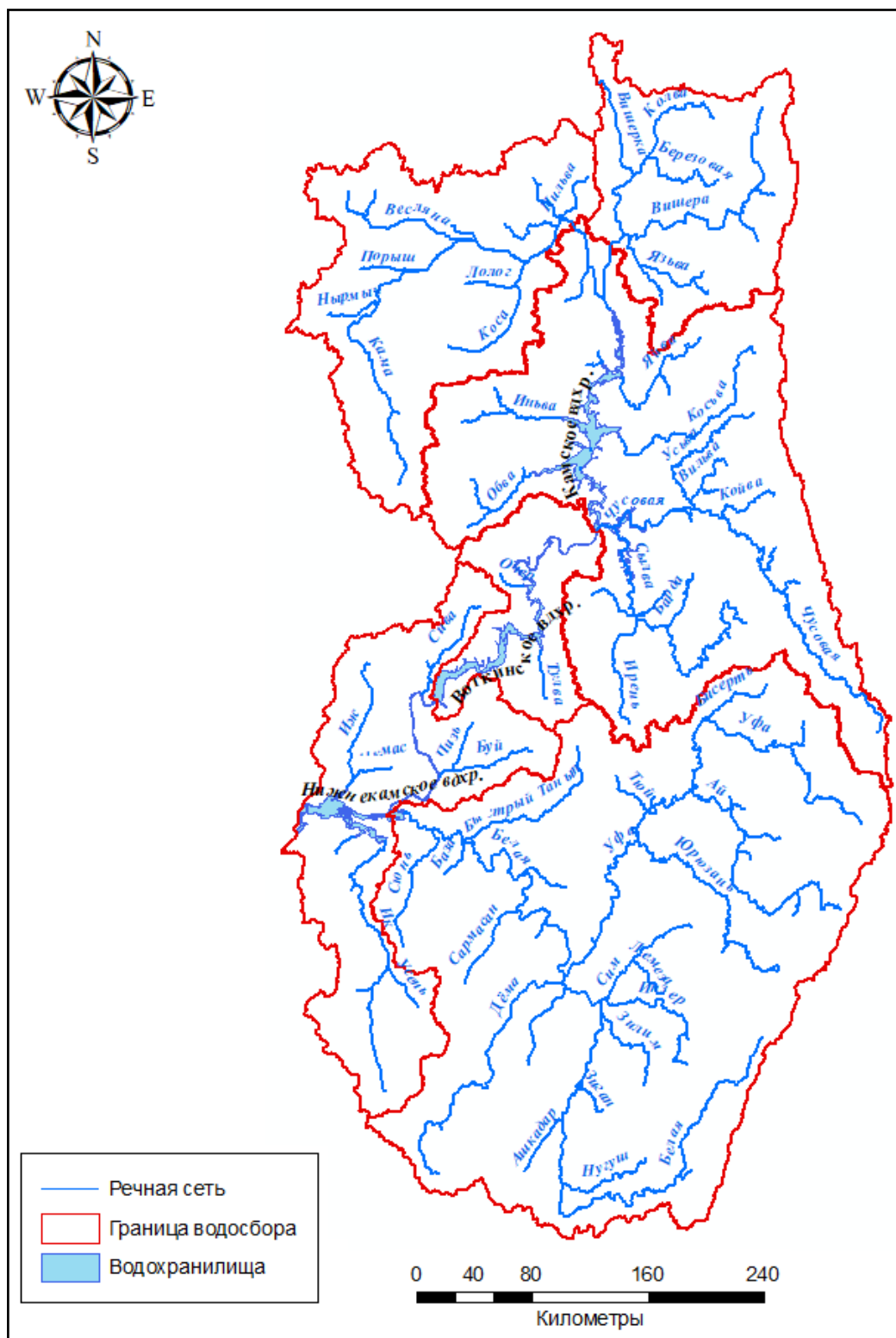


Рис. 3. Гидрографическая сеть водосбора Нижнекамского водохранилища

Основной водной артерией рассматриваемой территории является р. Кама и созданные на ней крупные водохранилища (рис. 3). Камское водохранилище (первое в каскаде) расположено в центральной части водосбора и вытянуто в меридиональном направлении. Водоохранилище очень сложное в морфологическом плане, отличается большой изрезанностью береговой линии и наличием крупных краевых заливов. Воткинское водохранилище (второе в каскаде) представляет собой узкий вытянутый с северо-востока на юго-запад водоем от г. Перми до г. Чайковского со значительной извилистостью, особенно в верхней и центральной частях (Пьянков, Шавнина, 2008). Нижнекамское водохранилище расположено в долине нижнего течения р. Камы.

Камское, Воткинское и Нижнекамское водохранилища осуществляют сезонное, недельное и суточное регулирование стока. Камское водохранилище, питающееся речным стоком, является регулятором каскада. Воткинское водохранилище, питающееся зарегулированным стоком, почти не имеет боковой приточности, а основной приток воды трансформируется вышележащим водохранилищем (Матарзин, 2003). Камское и Воткинское водохранилища формируют сопряженный каскад ГЭС. Нижнекамское водохранилище является третьей ступенью камского каскада, однако подпор от плотины Нижнекамской ГЭС не доходит до Воткинского гидроузла, поэтому каскад является разорванным. Подпор от Нижнекамского гидроузла (г. Набережные Челны) распространяется до г. Сарапула, расположенного в 70 км ниже Воткинской ГЭС.

Создание водохранилищ привело к тому, что многочисленные притоки в своих устьевых участках находятся в подпоре, выклинивание которого в течение года меняет свое положение в зависимости от высоты уровня воды в водохранилище и на притоке. Крупными притоками р. Камы являются Весляна, Коса, Вишера. Реки Яйва, Косьва, Чусовая, Иньва, Обва впадают непосредственно в Камское водохранилище. Воткинское водохранилище не имеет крупных притоков. Небольшие водотоки, впадающие справа, – Ласьва,

Нытва, Очер и Ошпа, левобережные – Мулянка, Тулва и Сайгатка. Нижнекамское водохранилище имеет несколько крупных притоков, таких как р. Мулёвка, Камбарка, Буй, Берёзовка, Ветлянка, Белая, Иж, Ик, Шильна, Челна (рис. 3).

Реки на территории водосбора Нижнекамского водохранилища неодинаковы по своему характеру. Левобережные притоки Камы, берущие начало на склонах Урала (Вишера, Яйва, Косьва, Чусовая, Белая и др.), в верховьях текут вдоль меридионально расположенных горных хребтов, имеют широкие долины, течение спокойное. При изменении направления на западные 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 течения – типичными для равнинных рек. Реки, берущие начало на Верхне-Камской возвышенности (Коса, Иньва, Обва), Северных Увалах (Весляна), реки южных и юго-западных районов (Тулва, Сайгатка) протекают в широких, с террасированными склонами, долинах. Русла рек извилисты, течения спокойные (Матарзин, 1959). Реки западной части территории водосбора Нижнекамского водохранилища протекают в широких, извилистых руслах со спокойным течением.

Озера и болота в бассейне Нижнекамского водохранилища распространены слабо. Основной тип озер – пойменные. Располагаются они обычно группами в местах расширения долин. Из других типов чаще всего встречаются карстовые. Наиболее крупные озера расположены в низинах северной части водосбора (Большой Кумикуш – 17,4 км², Чусовское – 19,4 км², Новожилово – 7,12 км², Нюхти – 6,3 км² и др.). Суммарная площадь озер на территории Прикамья составляет около 120 км² (Назаров, 2006). Глубина озер невелика и не превышает 9-10 м. Болот на территории бассейна сравнительно мало и располагаются они в основном на севере по долинам рек и на плоских водоразделах в бассейнах Весляны, Южной Кельтмы, Косы, Вишеры и Камы в ее верхнем течении.

2.2. Климатические условия

Климатические условия исследуемой территории наиболее подробно описаны в монографии А.С. Шкляева, В.А. Балкова (1963). Основными факторами, определяющими формирование климата водосбора Нижнекамского водохранилища, являются: географическое положение, особенности атмосферной циркуляции и характер подстилающей поверхности. В формировании климата ведущая роль принадлежит солнечной радиации. Распределение тепла на территории водосбора Нижнекамского водохранилища, в связи с его значительной протяженностью с севера на юг, неодинаково. В течение года север района получает на 15-20% солнечного тепла меньше, чем юг. Еще большие изменения в величинах суммарной солнечной радиации наблюдаются по сезонам. В летнее полугодие территория водосбора получает 80% годового количества тепла, в зимнее – около 20% (Шкляев, Балков, 1963).

По климатическим особенностям ряд авторов (Ситнов, 1936; Мельчаков, 1958; Кувшинова, 1968) выделяют Урал в самостоятельную климатическую область, принципиально отличную от прилегающих равнин. Положение района на востоке ЕТС во многом определяет степень влияния на него Атлантического океана с одной стороны и Арктики – с другой. Северное положение территории способствует частому вторжению холодных арктических масс воздуха, определяющих суровость климата. Циркуляция атмосферы определяется, главным образом, деятельностью Исландского минимума, Азорского максимума и Сибирского внутриконтинентального центра действия атмосферы (Алисов, Полтараус, 1962). Уральский хребет способствует задержанию влаги, которая выпадает в виде осадков с максимумом в северо-восточной части водосбора – более 800 мм в год (Атлас Пермской края, 2012). В западной части водосбора годовое количество осадков составляет около 500-550 мм. Большая часть осадков от 66 до 77% выпадает в теплое полугодие, остальная часть накапливается за зиму.

Колебания температуры воздуха обычно вызываются адвекцией тепла и холода. Особенности распределения давления определяют режим ветра, а также его направление. На исследуемой территории преобладают ветры юго-западного и западного направлений. Наибольшая повторяемость приходится на ветры со скоростью 1-6 м/с, их доля составляет 85,1%. Сильные ветры бывают сравнительно редко. Реже всего наблюдаются ветры со скоростью >15 м/с, их обеспеченность не превышает 0,2% (Научно-прикладной справочник..., 1990). В течение года направление ветра претерпевает существенные изменения, связанные с перестройкой сезонного поля давления: зимой барический градиент направлен с юга на север (от отрога Сибирского антициклона к северным морям), а летом – от более холодных, чем континент, морей в центр материка (с северо-запада на юго-восток).

При развитии циклонической деятельности наблюдается резкая смена погоды – с теплой при подходе циклона на холодную в тылу его. Резкий перепад температур особенно хорошо выражен, когда средние суточные температуры воздуха близки к 0°C. В периоды такой смены тепла и холода на реках и водохранилищах начинается появление льда осенью и его таяние весной.

Среднегодовые и среднемесячные температуры осени и весны изменяются по территории с юго-запада на северо-восток под действием рельефа и широты места (Шкляев, Балков, 1963). Средняя температура воздуха от сентября к октябрю понижается на 7-8°C. В октябре температура воздуха переходит через 0°C к отрицательным значениям.

С ноября по март на исследуемой территории устанавливается устойчивый снежный покров, интенсивное нарастание которого происходит в начале зимы (ноябрь-декабрь). Средняя из наибольших декадных высот снежного покрова на защищенных равнинных участках убывает с севера на юг от 80-50 см. В горных районах она изменяется от 120-150 см на севере до 50-70 см на юге. Высота снежного покрова на открытых участках значительно меньше, чем в лесу или в защищенных от ветра местах. Максимальные

снеготпасы наблюдаются обычно перед таянием снега весной. Распределение их по территории аналогично распределению высоты снежного покрова. Запасы воды в снеге убывают с севера на юг от 200 до 80 мм. Наибольшие запасы воды, превышающие 300 мм, наблюдаются в горной залесенной части территории (Ресурсы ..., 1973).

Продолжительность устойчивого снежного покрова составляет в среднем 150-180 дней. В результате выпавшего снега отражательная способность земной поверхности резко возрастает, что способствует ее охлаждению и интенсивному выхолаживанию приземных слоев воздуха. Все это приводит к дальнейшему понижению температуры (Дубровин и др., 1959). Самый холодный месяц – январь. Среднемесячная температура воздуха в январе изменяется по территории водосбора Нижнекамского водохранилища от $-17,4^{\circ}\text{C}$ на севере до $-11,3^{\circ}\text{C}$ на юге, а средние значения из абсолютных минимумов температуры воздуха составляют по разным метеостанциям от -38°C до -34°C . Абсолютный температурный минимум (-50°C) наблюдался в январе 1979 г. (Научно-прикладной справочник ..., 1990).

На сток весеннего половодья существенное влияние оказывает фактор промерзания почвы в зимний период. По данным «Ресурсов...» (1973), среднемноголетняя величина наибольшей глубины промерзания почвы увеличивается с севера на юг от 50 до 100 см. Это происходит вследствие уменьшения высоты снежного покрова к югу при незначительном изменении температуры воздуха по территории. Наибольшая глубина промерзания почвы составляет, соответственно, от 60 до 150 см, а местами на оголенных участках может достигать 2-3 м; наименьшая – колеблется от 10 до 100 см. Полное оттаивание почвы на большей части территории происходит обычно в первой декаде мая, в южной части водосбора – в последней декаде апреля.

По данным наблюдений на метеорологических станциях (МС) среднемноголетние даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0°C к положительным значениям в пределах водосбора Нижнекамского водохранилища изменяются от 5 апреля на юге до 13 апреля на севере. Начало

весеннего снеготаяния наблюдается, как правило, еще до перехода через 0°C, при установлении положительных температур воздуха в дневное время. Обычно оно начинается в третьей декаде марта, продолжаясь 15-20 дней в равнинной части территории и более 25 – в горной (Ресурсы ..., 1973). Повышение среднемесячной температуры воздуха от апреля к маю составляет 7-8°C, что приводит к разрушению ледяного покрова на реках и водохранилищах. В конце апреля и начале мая обычно наблюдаются возвраты холодов, повторяющиеся почти ежегодно, что связано с вторжением арктических масс воздуха. Снежный покров на водосборе сохраняется в среднем до третьей декады апреля – первой декады мая.

Колебания сроков наступления соответствующих рубежей и характеристик перехода температуры воздуха через определенные пределы зависят от типов атмосферной циркуляции с преобладающим направлением переноса холодных и теплых воздушных масс в переходные периоды года.

При западной форме циркуляции наблюдается западно-восточный перенос воздушных масс со стороны Атлантики на континент. Это вызывает адвекцию тепла и повышение температуры воздуха, что отодвигает осень в позднюю, а весной – в раннюю сторону, соответственно, процессы замерзания и разрушения ледяного покрова на реках и водохранилищах. При меридиональной форме циркуляции осуществляется межширотный воздухообмен с достаточно частыми вторжениями холодного воздуха Арктики, что приводит к адвекции холода в средние широты, существенно понижает температуру воздуха (Шкляев, Балков, 1963) и вызывает раннее замерзание водных объектов осенью и позднее разрушение льда весной. При восточной форме циркуляции проявляется воздействие местных физико-географических факторов на разнообразные температурные условия, сроки замерзания и разрушения ледяного покрова близки к среднемноголетним.

Таким образом, физико-географическое положение водосбора Нижнекамского водохранилища на северо-востоке Русской равнины и на западном склоне Уральских гор, а также значительная протяженность с севера

на юг обуславливают наличие широтной зональности и высотной поясности природных процессов на рассматриваемой территории. Это определяет основные закономерности пространственного распределения факторов формирования водного режима рек и водохранилищ.

2.3. Хозяйственная деятельность

Водосборная территория Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ (общей площадью 370 тыс. км²) охватывает несколько крупных субъектов Российской Федерации: Пермский край, Республику Татарстан, Удмуртскую Республику, Республику Башкортостан, Республику Коми, Кировскую и Свердловскую области. Это один из наиболее густонаселенных и промышленно развитых регионов страны. Хозяйственная деятельность на водосборах определяет объёмы и состав как точечных (промышленные и коммунальные сбросы), так и диффузных (смыв с полей, урбанизированных территорий) источников загрязнения (Данилов-Данильян и др., 2020).

Ниже приведена характеристика основных видов хозяйственной деятельности, ранжированных по их вкладу в формирование гидролого-геохимических процессов и диффузного стока загрязняющих веществ.

Сельское хозяйство. Сельскохозяйственные угодья занимают около 132 535 км², что составляет 36% от общей площади водосбора камских водохранилищ (табл. 1). При этом распределение пашни крайне неравномерно: на водосборе Нижнекамского водохранилища сосредоточено 79% всех сельскохозяйственных полей каскада (105 357 км², 57% от площади частного водосбора), тогда как на водосборе Камского водохранилища доля пашни составляет всего 12%, а на Воткинском – 42% от площади частного водосбора (но абсолютные площади невелики – 6 637 км²) (расчёты автора по данным Global Land Cover, 2020; СКИОВО, 2014).

Таблица 1

Площади и структура землепользования на водосборах камских водохранилищ

Показатель	Единица	Камское	Воткинское	Нижнекамское	Всего по каскаду
Площадь водосбора	км ²	168 000	16 000	186 000	370 000
Площадь с/х полей	км ² (%)	20 541 (12%)	6 637 (42%)	105 357 (57%)	132 535 (36%)
Площадь лесного покрова	км ² (%)	133 258 (79%)	7 870 (49%)	77 269 (41%)	218 397 (59%)
Площадь урбанизированных территорий	км ² (%)	1 500 (0,9%)	800 (5,0%)	1 500 (0,8%)	3 800 (1,0%)

Основные сельскохозяйственные культуры. В структуре посевных площадей преобладают зерновые (пшеница, ячмень, овёс), кормовые культуры (кукуруза на силос, многолетние травы) и технические культуры (подсолнечник, рапс, сахарная свёкла – преимущественно в Татарстане и Башкортостане). В Пермском крае и Удмуртии значительную долю занимают кормовые культуры, что связано с развитием молочного животноводства (ЕМИСС).

Удобрения и химизация. Интенсивность применения минеральных удобрений существенно различается по регионам:

- **Республика Татарстан** (основная часть водосбора Нижнекамского водохранилища): 100-130 кг д.в./га (действующего вещества) – максимальные показатели по каскаду;
- **Удмуртская Республика** (водосбор Воткинского и частично Нижнекамского водохранилищ): 70-90 кг д.в./га;
- **Пермский край** (водосбор Камского и Воткинского водохранилищ): 50-70 кг д.в./га – минимальные показатели.

Органические удобрения (навоз КРС, птичий помёт) вносятся в основном в частном секторе и на мелких фермах, их объёмы сложно поддаются статистическому учёту (СКИОВО, 2014). По экспертным оценкам, в Татарстане и Удмуртии вносится до 5-8 т/га органики в год.

Экологические риски от сельского хозяйства:

- Смыв азота и фосфора с полей в период весеннего снеготаяния и ливневых дождей. Как показано в Главе 5, именно сельскохозяйственные ландшафты вносят 58-72% суммарного выноса биогенов в водохранилища.
- Локальные превышения ПДК нитратов в малых реках весной (до 2–3 ПДК в бассейнах рек Иж, Тулва, Буй).
- Эвтрофикация водохранилищ, особенно Нижнекамского, где биогенная нагрузка максимальна.

Промышленный комплекс. Водосбор камских водохранилищ охватывает крупнейшие промышленные центры Приволжского федерального округа. Общее количество промышленных предприятий на водосборах превышает 800, из них 512 (62%) расположены на водосборе Нижнекамского водохранилища, 184 (23%) – на водосборе Воткинского и 121 (15%) – на водосборе Камского водохранилища (табл. 2) («Заводы.рф»).

Водопользование промышленностью. Общий забор воды в бассейне Камы превышает 800 млн м³/год. Доля оборотного водоснабжения на крупных предприятиях составляет более 85%, однако абсолютные объёмы сбросов остаются значительными. Сточные воды предприятий проходят механико-биологическую очистку, однако в аварийных ситуациях и при переполнении очистных сооружений возможны сбросы с превышением ПДК по:

- ХПК и БПК₅ (органические загрязнения – пищевая, целлюлозно-бумажная промышленность);
- аммоний и нитратам (химическая промышленность, производство удобрений);
- нефтепродуктам (нефтепереработка, нефтехимия).

Крупнейшие промышленные предприятия на водосборах камских водохранилищ

Водохранилище	Город	Предприятие	Отрасль
Камское	Березники	ПАО «Уралкалий»	Добыча калийных солей
	Березники	ПАО «Березниковский содовый завод»	Химическая промышленность
	Соликамск	ПАО «Соликамскбумпром»	Целлюлозно-бумажная
	Александровск	ОАО «Кизеловский угольный бассейн» (ликвидирован)	Угольная (шахтные воды)
Воткинское	Пермь	ПАО «Пермская ГРЭС»	Энергетика
	Пермь	АО «Пермский мукомольный завод»	Пищевая
	Пермь	ПАО «Пермский моторный завод»	Машиностроение
	Пермь	ООО «Лукойл-Пермнефтеоргсинтез»	Нефтепереработка
	Краснокамск	ООО «Краснокамский завод ЖБК»	Строительные материалы
Нижнекамское	Набережные Челны	ПАО «КАМАЗ»	Машиностроение (автомобилестроение)
	Нижнекамск	ПАО «Нижнекамскнефтехим»	Нефтехимия
	Нижнекамск	ПАО «Нижнекамская ГЭС»	Энергетика
	Менделеевск	АО «Менделеевсказот»	Химическая промышленность
	Уфа	ПАО «Уфаоргсинтез»	Нефтехимия
	Ижевск	АО «Ижевский механический завод»	Машиностроение

Наиболее проблемные с точки зрения техногенного загрязнения участки (Китаев, 2007; Китаев, Рочев, 2007; Богомоллов и др., 2021):

- **Березниковско-Соликамский промузел** (Камское водохранилище): сбросы калийного производства, разливы шахтных вод ликвидированных угольных шахт (высокие концентрации хлоридов, сульфатов, железа).
- **Пермско-Краснокамский промышленный узел** (Воткинское водохранилище): нефтепереработка, машиностроение, энергетика (нефтепродукты, тяжёлые металлы, фенолы).
- **Нижнекамско-Набережночелнинский узел** (Нижнекамское водохранилище): нефтехимия, автомобилестроение (нефтепродукты, цинк, медь, хром)

Урбанизированная территория. На водосборах камских водохранилищ расположено 50 городов с населением свыше 50 000 человек (табл. 3). Наибольшее их количество (33 города) приходится на водосбор Нижнекамского водохранилища (включая крупнейшие города: Уфа – 1,1 млн чел., Ижевск – 650 тыс. чел., Набережные Челны – 550 тыс. чел., Нижнекамск – 240 тыс. чел.). На водосборе Камского водохранилища – 13 городов (крупнейшие: Березники – 135 тыс. чел., Соликамск – 90 тыс. чел.), на водосборе Воткинского – 4 города (крупнейшие: Пермь – 1,0 млн чел., Чайковский – 80 тыс. чел.) (ЕМИСС).

Таблица 3

Характеристика урбанизированных территорий на водосборах камских водохранилищ

Показатель	Камское	Воткинское	Нижнекамское
Количество городов (>50 тыс. чел.)	13	4	33
Крупнейшие города (тыс. чел.)	Березники (135), Соликамск (90)	Пермь (1000)	Уфа (1100), Ижевск (650), Наб. Челны (550)
Доля городского населения в частном водосборе, %	70%	85%	65%

Экологические проблемы урбанизированных территорий (Кашутина и др., 2021; Кашутина, 2024; Соболев, 2022):

1. **Утечки в канализационных сетях.** В старых городах (Березники, Соликамск, Ижевск, Сарапул) утечки из сетей канализации достигают 20-25% от объёма транспортируемых сточных вод, что приводит к загрязнению грунтовых вод аммонийным азотом и патогенными микроорганизмами.

2. **Ливневая канализация.** В большинстве городов ливневая канализация отсутствует или сбрасывает стоки без очистки непосредственно в водотоки. Это приводит к выносу нефтепродуктов (до 5-10 ПДК), взвешенных веществ (до 3-5 ПДК), тяжёлых металлов (медь, цинк, свинец) в реки (р. Мулянка, р. Егошиха в Перми, р. Иж в Ижевске, р. Буй в Татарстане).

3. **Сельская местность.** В населённых пунктах, не подключённых к центральной канализации (это 30-50% сельского населения), отходы

жизнедеятельности поступают в грунтовые воды через выгребные ямы и септики. Это создаёт нитратное загрязнение подземных вод (концентрации нитратов до 50-100 мг/л при ПДК 45 мг/л по СанПиН для питьевой воды).

Добыча полезных ископаемых.

На водосборе камских водохранилищ ведётся добыча нескольких видов полезных ископаемых (табл. 4) (Государственный доклад о состоянии минерально-сырьевой базы РФ, 2021; Горбунова и др., 1992).

Таблица 4

Основные месторождения полезных ископаемых на водосборах камских водохранилищ

Водохранилище	Месторождение/район	Вид добычи	Экологические риски
Камское	Верхнекамское месторождение (Березники, Соликамск)	Калийные соли	Засоление рек (р. Усолка), отвалы галита
	Кизеловский угольный бассейн (ликвидирован)	Каменный уголь	Шахтные воды с высоким содержанием железа и сульфатов
Воткинское	Южно-Камское месторождение	Нефть	Загрязнение грунтовых вод нефтепродуктами
Нижнекамское	Ромашкинское месторождение (Татарстан)	Нефть	Утечки из нефтепроводов, шламовые амбары
	Туймазинское месторождение (Башкортостан)	Нефть	Осолонение пластовых вод

Экологические риски добычи полезных ископаемых (Фащевская и др., 2023):

- **Засоление рек** (в бассейне р. Усолка, притока Камского водохранилища): концентрации хлоридов достигают 300-500 мг/л при ПДКр.х. 300 мг/л.
- **Загрязнение грунтовых вод нефтепродуктами и тяжёлыми металлами** в районах нефтедобычи (Татарстан, Башкортостан).

Кислые шахтные воды ликвидированных угольных шахт (Кизеловский бассейн): высокие концентрации железа (до 10-15 мг/л), сульфатов (до 1000-1500 мг/л), низкие значения pH (3-4).

Таким образом, водосбор Камы – это ядро промышленного и аграрного потенциала Поволжья, но одновременно – зона высокого экологического риска. Ниже приведена сводная табл. 5 хозяйственной деятельности.

Таблица 5

Сводная характеристика хозяйственной деятельности на водосборах камских водохранилищ

Экономико-географические показатели	Единицы измерения	Общая характеристика для трех водохранилищ	Водохранилища		
			Камское	Воткинское	Нижекамское
Площадь водосбора	км ²	370000	168000	16000	186000
	%	100%	45%	4%	80%
Площадь с/х полей	км ²	132535	20541	6637	105357
	%	36%	12%	42%	57%
Площадь лесного покрова	км ²	218397	133258	7870	77269
	%	59%	79%	49%	41%
Площадь водной поверхности, урбанизированной территории, вырубок, гарей и болот	км ²	19068	14201	1493	3374
	%	5%	9%	9%	2%
Количество промышленных предприятий	шт.	817	121	184	512
	%	100%	15%	23%	62%
Количество городов (свыше 50000 чел.)	ед.	50	13	4	33
	%	100%	26%	8%	66%

Таким образом, водосборы камских водохранилищ представляют собой сложный комплекс природных и антропогенных факторов, формирующих гидролого-геохимический режим водных объектов (Ясинский и др., 2023). Дифференцированный подход к управлению водными ресурсами, учитывающий специфику каждого из трёх водохранилищ, является необходимым условием для снижения антропогенной нагрузки и улучшения качества воды.

2.4. Исходных данные для оценки и прогноза диффузного загрязнения водных объектов с учетом гидролого-геохимических процессов на их водосборах

Для решения поставленных в диссертации задач (оценка водного режима, гидрохимического состояния, диффузного стока биогенных элементов и его прогноза) был сформирован комплекс исходных данных, охватывающий гидрологические, гидрохимические, картографические и статистические параметры за период 2002-2022 гг. Ниже приведена характеристика основных источников информации.

Гидрологические данные. Исходными данными для анализа многолетней и внутригодовой изменчивости приходных и расходных элементов водного баланса и уровня режима Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ использованы материалы ежедневных наблюдений за 2002-2022 годы (<http://gis.vodinfo.ru>). Для выявления меж- и внутригодовых изменений гидролого-гидрохимических характеристик камских водохранилищ использовались материалы ежедневных наблюдений за основными составляющими приходной и расходной частей водного баланса в период с 2002 по 2022 гг.

Данные включают среднесуточные значения притока воды к каждому водохранилищу, расхода воды через гидроузлы (Камскую, Воткинскую и Нижнекамскую ГЭС) и уровня воды в верхнем бьефе. На основе этих данных были рассчитаны среднемесячные и среднегодовые значения, а также выполнена оценка водности лет по эмпирическим кривым обеспеченности (согласно СП 529.1325800.2023). В качестве характерных лет разной водности выбраны: средний по водности – 2014 г., многоводный – 2019 г., маловодный – 2021 г.

Гидрохимические данные. Для анализа многолетних, годовых и сезонных изменений концентраций химических элементов для Камского,

Воткинское и Нижнекамское водохранилищ использованы материалы наблюдений КамБВУ за 2003-2022 гг. (табл. 6).

Таблица 6

Количество точек отбора проб на камских водохранилищах

Годы	Камское водохранилище		Воткинское водохранилище		Нижнекамское водохранилище	
	Точки отбора	%	Точки отбора	%	Точки отбора	%
2003	-	-	-	-	1	4,5
2004	-	-	-	-	1	4,5
2005	4	57	5	45	1	4,5
2006	4	57	5	45	1	4,5
2007	4	57	5	45	3	13,6
2008	6	86	7	64	3	13,6
2009	6	86	7	64	3	13,6
2010	6	86	7	64	16	72,7
2011	7	100	11	100	18	81,8
2012	7	100	11	100	20	90,9
2013	7	100	11	100	22	100
2014	7	100	11	100	22	100
2015	7	100	11	100	22	100
2016	7	100	11	100	22	100
2017	7	100	11	100	22	100
2018	7	100	11	100	22	100
2019	7	100	11	100	22	100
2020	7	100	11	100	22	100
2021	7	100	11	100	22	100
2022	7	100	11	100	22	100

Следует отметить, что период наблюдений на некоторых постах неодинаков. На Камском и Воткинском водохранилищах данные осреднялись с 2005 по 2022 гг., на Нижнекамском с 2010 по 2022 гг.

Отбор проб проводился суммарно в 40 точках (табл. 7). Из них 29 расположены до впадения р. Белой, 9 – находятся на р. Белая и 2 – после впадения р. Белой, в озеровидной части Нижнекамского водохранилища. Схема расположения точек отбора приведена в Приложении Б.

Сезонные концентрации веществ рассчитывались для четырех сезонов: зимняя сработка (ноябрь–март), весеннее наполнение (апрель–июнь), период летней (июль–август) и осенней (сентябрь–октябрь) стабилизации уровня воды и навигационной сработки.

Расчет сезонного стока в тоннах выполнялся следующим образом: для каждого сезона был рассчитан средний сток каждого показателя в тоннах за сутки (т/сут), затем эта величина умножалась на количество дней в сезоне (зимняя сработка – 151 день, весеннее наполнение – 91 день, летне-осенняя стабилизация и навигационная сработка – 62 дня и 61 день соответственно). Результаты расчетов для Нижнекамского водохранилища представлены без учета створов на р. Белой.

Данные для расчетов включали 20 химических элементов на Камском и Воткинском водохранилищах и 18 на Нижнекамском (табл. 8). На Нижнекамском водохранилище отсутствуют сведения по таким элементам, как азот нитритов и азот минеральный. Измерения проводились один раз в месяц, или реже (от 8 до 12 раз в год). В зимний сезон выполнялось 3-5 измерений, в период весеннего половодья 2-3, в летне-осеннюю межень и дождевые паводки – 1-2 измерения.

Химические элементы разделены на 6 основных групп: биогенные элементы, тяжелые металлы (микроэлементы), кислород и его интегральные показатели, главные ионы, токсичные вещества (загрязняющие вещества) и взвешенные вещества.

Для оценки химического состава воды использованы предельно допустимые концентрации в водоеме, используемые для рыбохозяйственных целей (ПДКр.х.). ПДКр.х. – это максимальная концентрация вредного вещества в воде, которая не должна оказывать вредного влияния на популяции рыб, в первую очередь промысловых. Значение ПДКр.х. были взяты из утвержденного норматива по качеству воды водных объектов рыбохозяйственного значения (Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N552).

Местоположение отбора проб на камских водохранилищах

№	Водохранилище	Водосбор реки	Местоположение точек отбора проб	
1	Камское	Кама	д. Пыскор	
2			д. Пахнино, в створе водозабора Пермской ГРЭС; в поверхностном слое	
3			д. Заполье	
4			д. Хохловка	
5			п. Новые Ляды, в створе водозабора Лядовский (7 км Сылвенского залива)	
6			п. Гари, в створе водозабора Чусовской (12 км Чусовской залива)	
7			мкр. Левшино, верхний бьеф Камской ГЭС	
8	Воткинское	Кама	мкр. Запруд, в створе водозабора Большекамский	
9			ст. Пермь-1	
10			п. Нижняя Курья	
11			мкр. Закамск, в створе Кировской фильтровальной станции	
12			п. Ниж. Муллы, ниже БОС г. Пермь	
13			д. Чирки, 1 км выше впадения р. Б.Ласьва	
14			п. Усть-Качка, 2 км выше впадения р. Качка	
15			п. Уральский	
16			п. Усть-Нытва	
17			д. Десятково	
18		Верхний бьеф Воткинской ГЭС		
19	Нижнекамское	Кама	Зона выклинивания Нижнекамского вдхр., с. Яромаска	
20			Створ ниже г. Сарапул	
21			с. Шолья, 1 км ниже впадения р. Шолья	
22			Устье р. Камбарка	
23			Устье р. Буй	
24			Устье р. Березовка	
25			Створ № 1 500 м выше места сброса СВ МУП "Нефтекамск-водоканал"	
26			Створ № 2 500 м ниже места сброса СВ МУП "Нефтекамск-водоканал"	
27			Переправа Боярка	
28			с. Саклово	
29			с. Каракулино	
№	Водохранилище	Водосбор реки	Местоположение отбора проб	
30	Нижнекамское	Белая	Насосная станция № 1, инженерная защита Янзигитовской сельскохозяйственной низины, ниже сбросного канала	
31			Насосная станция № 2, инженерная защита Янзигитовской сельскохозяйственной низины	
32			Насосная станция № 3, инженерная защита Янзигитовской сельскохозяйственной низины	
33			Насосная станция № 4, инженерная защита Янзигитовской сельскохозяйственной низины	
34			Устье р. Миниште	
35			Устье р. Ашаеш, насосная станция № 1, инженерная защита Янгузнатовской сельскохозяйственной низины	
36			с. Актаныш	
37			Створ 500 м выше места сброса СВ ООО "УЖКХ", г. Агидель	
38			Створ 500 м ниже места сброса СВ ООО "УЖКХ", г. Агидель	
39			После впадения р. Белая	Створ в устье р. Белая, д. Усть-Бельск
40				д. Зуевы Ключи

Таблица 8

**Данные о наличии и отсутствии химических элементов и их ПДКр.х.
в водохранилищах Камского каскада**

№	Химические элементы	ПДКр.х.	Водохранилища		
			Камское	Воткинское	Нижнекамское
Биогенные элементы					
1	Азот аммонийный	0,4	+	+	+
2	Азот минеральный	–	+	+	–
3	Азот нитритов	0,02	+	+	–
4	Аммоний-ион	0,5	+	+	+
5	Нитриты	0,08	+	+	+
6	Нитраты	40	+	+	+
7	Фосфат-ион (по фосфору, мезо)*	0,2	+	+	+
8	Железо общее	0,1	+	+	+
Тяжелые металлы					
9	Медь	0,001	+	+	+
10	Никель	0,01	+	+	+
11	Свинец	0,006	+	+	+
12	Цинк	0,01	+	+	+
Главные ионы					
13	Сульфаты	100	+	+	+
14	Хлориды	300	+	+	+
Токсичные вещества					
15	Фенолы	0,001	+	+	+
16	Нефтепродукты	0,05	+	+	+
Кислород и его интегральные показатели					
17	Растворенный кислород	4	+	+	+
18	ХПК	15	+	+	+
19	БПК ₅	2,1	+	+	+
Взвешенные вещества					
20	Взвешенные вещества	10	+	+	+
Общее количество элементов			20	20	18

* На Нижнекамском водохранилище выполнен анализ изменения фосфатов по фосфору, эвтр; на Камском и Воткинском водохранилищах – по фосфат-иону (по фосфору, мезо).

Данные о сточных водах. Информация по сточным водам для Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ получена за период 2010–2021 гг. по данным сайта Автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО, 2022, <https://gmvo.skniivh.ru>). Данные по поступлению сточных вод имеются по

р. Каме и боковым притокам: Косьва, Чусовая (с г. Ревда), Сылва, Буй, Иж, Ик, Белая.

В анализ включены 18 показателей поступления загрязняющих веществ в тоннах со стоком р. Камы и её притоков: азот аммонийный (т), азот общий (т), аммоний-ион (т), БПК полн. (т), взвешенные вещества (т), железо (кг), медь (кг), нефтепродукты (нефть) (т), никель (кг), нитрат-анион (кг), нитрит-анион (кг), свинец (кг), сульфат-анион (сульфаты) (т), фенол (гидроксибензол) (кг), фосфаты (по фосфору) (т), хлорид-анион (хлориды) (т), ХПК (кг), цинк (кг) (АИС ГМВО, 2022).

Картографические данные и данные дистанционного зондирования.

Для пространственного анализа и картографического обеспечения моделирования использовались следующие данные:

- Цифровая модель рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) с разрешением растровой ячейки 30 м (<https://www.dwtkns.com/srtm30m>). На её основе были выделены границы водосборов водохранилищ и речная сеть.

- Тематические картографические слои, полученные с OpenStreetMap. Выделены 8 классов угодий: леса, пахотные земли, луга и пастбища, урбанизированные территории, болота, водные объекты, овражно-балочная сеть, открытый грунт.

- Почвенная карта РФ масштаба 1:2 500 000 (Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, <http://egrpr.soil.msu.ru>). Использована для оценки содержания биогенных веществ в верхнем слое почвы (0,2 м) при расчёте выноса с эрозией.

Статистические данные о хозяйственной деятельности.

В работе использовались статистические данные о хозяйственной деятельности на водосборах камских водохранилищ, полученные из следующих источников:

1. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС) – данные о внесении минеральных удобрений по субъектам РФ за 2008–2022 гг. (<https://fedstat.ru>).

2. Промышленная карта РФ (<https://заводы.рф/map>) – данные о местоположении и отраслевой принадлежности промышленных предприятий.

3. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Кама (СКИОВО, 2014) – данные о водохозяйственных участках, нормативах качества воды и антропогенной нагрузке.

Площадные характеристики получены с использованием материалов Института космических исследований в рамках международного проекта *Global Land Cover* (Arino et al., 2008) и *OpenStreetMap*. Количественные показатели определены самостоятельно с использованием информации на сайте «Федеральной службы государственной статистики» (ЕМИСС), а также с применением картографического материала, опубликованного в свободном доступе (<https://заводы.рф/>).

Структура земель водосборов камских водохранилищ приведена в табл. 5. На территории водосбора Камского водохранилища остались необработанные, первичные ландшафты, характеризующие зональный природный фон. Леса, занимающие 79% территории, еще не подвергаются активному хозяйственному использованию, но на них оказывает воздействие загрязненная промышленными выбросами атмосфера.

На территории водосбора Воткинского водохранилища без учета водосбора Камского водохранилища расположено наименьшее количество промышленных предприятий и городов с численностью населения более 50000 чел. Наибольшие площади сельскохозяйственных земель (105357 км² из 132535 км²), количество промышленных предприятий (512 из 817) и городов с населением свыше 50000 чел. (33) расположены на территории водосбора Нижнекамского водохранилища.

3. Анализ функционирования водохранилищ Камского каскада в нормальных и экстремальных условиях

3.1. Характеристика водохранилищ Камского каскада и гидрологического режима рек рассматриваемой территории

Гидрологический режим рек рассматриваемой территории достаточно подробно изложен в «Ресурсах ...» (1973). Поэтому остановимся лишь на краткой характеристике его основных особенностей. Формирование стока рек определяется комплексом природных условий водосбора, включающим не только особенности земной поверхности, но и толщи почв и горных пород, дренируемых руслами. В то же время главным фактором, определяющим тип водного режима рек, особенности распределения стока внутри года, является климат. При этом основная роль принадлежит температуре воздуха, определяющей сроки начала и окончания климатических сезонов (Комлев, 2002).

Весеннее половодье обычно начинается в апреле, причем на севере территории и в горной части – во второй половине месяца, а на юге – в первых числах апреля. Продолжительность половодья зависит от размеров бассейнов рек и их высотного положения, а также увлажненности территории и, прежде всего, величины снеготаяния к началу снеготаяния. Сроки окончания весеннего половодья варьируют, как правило, сильнее, чем сроки начала. Так, например, на равнинных реках бассейна Камы (водосборы площадью 5-10 тыс. км²) крайние сроки начала половодья различаются на 25-30 сут., а окончания – на 30-45 сут. (Комлев, 2002). В горных районах период половодья при прочих равных условиях больше, чем на равнине, что связано с затяжным характером снеготаяния из-за разновременного перехода температуры воздуха через 0°С в разных высотных поясах (Ресурсы ..., 1973). В верхней части бассейна р. Вишеры и на р. Усьве крайние сроки начала половодья различаются на 40 дней, а его окончания – на 60-65 дней (Комлев, 2002). На

весну в среднем приходится 62 % годового стока, при этом увеличение доли (65-70% и более) весеннего стока наблюдается на малых реках центральной равнинной части водосбора: Велва, Кондас, Кува, Сива, Верхняя Кама и на юго-востоке (р. Сулем) (Калинин, 2006а).

Интенсивность подъема уровней в среднем составляет на малых водотоках 10-15 см, на более крупных реках обычно 20-30 см в сутки. Максимальные величины суточного приращения уровня воды достигают 1-2 м, а на отдельных реках 2,5-3,5 м (Ай, Сюнь и др.). Нередко наиболее интенсивные подъемы уровня связаны с заторными явлениями в период прохождения половодья. Спад уровней происходит медленно. Наибольшее величины падения уровня за сутки обычно не превышают 80-120 см, хотя на отдельных реках иногда достигают 2 м (Ресурсы ..., 1973).

Летне-осенняя межень. Устойчивое стояние уровня воды и слабое изменение водности в течение летне-осеннего периода наблюдается главным образом на реках лесостепной зоны. Дождевые подъемы здесь очень незначительны и имеют место не ежегодно. В лесной зоне равнинной части территории дождевые паводки являются обычным явлением и характеризуются более высокими подъемами уровня воды. Как отмечает А.М. Комлев (2002), в среднем за летне-осенний период на реках этой зоны наблюдается 1-3 паводка, в дождливые годы число их увеличивается до 4-8. По сравнению с южными лесостепными районами, где продолжительность устойчивой межени на реках достигает в среднем 110-150 дней, в лесной зоне длительность безпаводочных периодов несколько меньше – на разных реках от 70 до 120 дней. Наиболее неустойчивым характером межени, часто прерываемой дождевыми паводками, отличаются горные реки. На реках Среднего и Южного Урала повторяемость дождевых паводков несколько уменьшается. По мере увеличения размеров рек межень при прочих равных условиях приобретает более устойчивый характер, дождевые подъемы снижаются и, как правило, по высоте значительно уступают весеннему половодью.

Доля летне-осеннего стока составляет в среднем 24% годового и мало меняется по территории. Наибольших значений она достигает в горах (бассейны рек Вишеры и Койвы), наименьших – в юго-западной части водосбора, что связано с распределением осадков по территории.

Зимняя межень отличается устойчивостью, низким стоком и большой продолжительностью, которая тесно связана с ходом температуры воздуха и достигает в среднем 140-160 дней. 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 его окончание (начало весеннего снеготаяния и увеличение расходов воды на реке) (Комлев, 2002). Изменение величины стока за период зимней межени определяется изменениями запасов подземных вод, накопленных в бассейне к началу зимнего сезона.

С начала ледообразования водность рек быстро снижается, причем в северных районах минимум ее обычно наступает в марте, в более южных районах – преимущественно в феврале. Ход уровней воды в зимний период обычно не соответствует плавному изменению водности рек. В начале зимы для многих рек характерны заборные подъемы уровня воды, а также периодические его повышения, связанные с образованием наледей. Весной нередко наблюдаются заторные подъемы. Нарушения плавного снижения стока зимней межени являются почти исключительно результатом хозяйственных мероприятий, в частности сбросов воды из прудов и водохранилищ.

Гидрологический режим водохранилищ имеет существенные отличия от режима естественных водных объектов, на базе которых они созданы. Эти отличия определяются специфическими особенностями водохранилищ как новых водных объектов суши (Матарзин и др, 1997; Матарзин, 2003), их положением в каскаде и характером морфометрии. Регулирование стока Камской, Воткинской и Нижнекамской ГЭС определяется в соответствии с

«Правилами использования...» (ПИВР, 2016, 2014). Водохранилища осуществляют сезонное, недельное и суточное регулирование стока.

Камское водохранилище – регулятор каскада с напором 21,0 м (рис. 4). Наполнение водоема началось в 1954 г., закончилось в 1956 г. Гидроузел расположен в г. Перми ниже впадения р. Чусовой. Подпор от плотины при нормальном подпорном уровне (НПУ) распространяется вверх по р. Каме на 300 км. Площадь водосбора в створе Камской ГЭС составляет 168000 км² (ПИВР, 2016). Водохранилище вытянуто в меридиональном направлении, отличается большой изрезанностью береговой линии и наличием крупных краевых заливов. В подпоре от Камского гидроузла находятся реки Яйва, Кондас, Косьва, Иньва, Обва, Чусовая, Сылва.

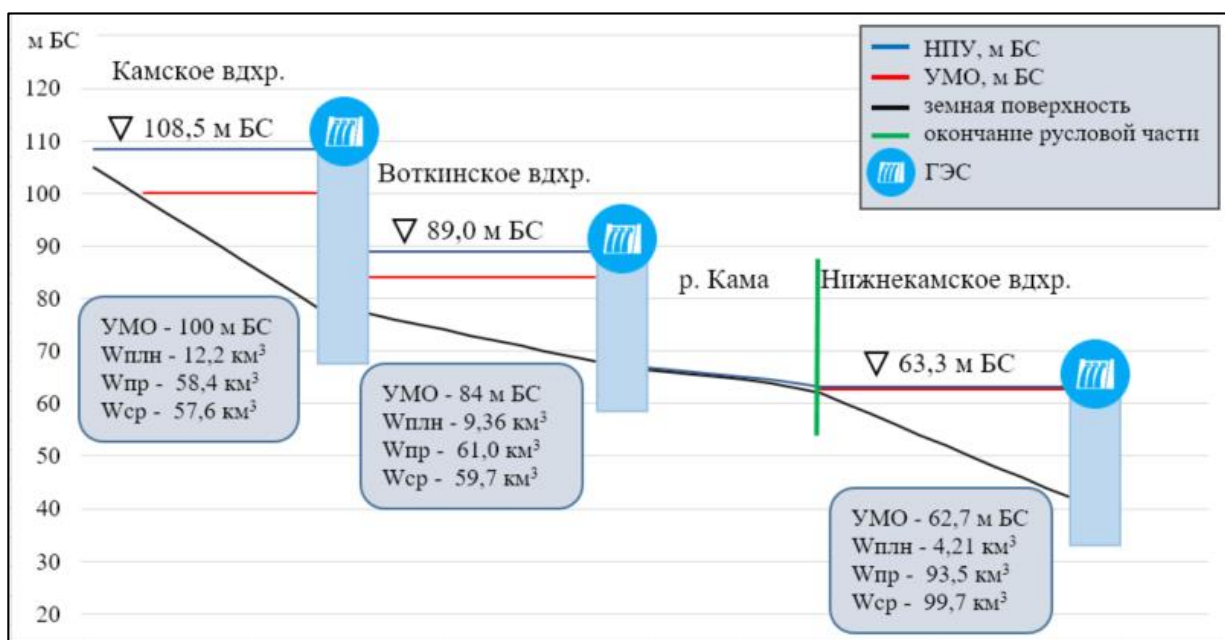


Рис. 4. Схема водохранилищ Камского каскада

Воткинское водохранилище – вторая ступень каскада с напором 23 м. Образовано в результате сооружения плотины Воткинской ГЭС у г. Чайковского. Наполнение водоема началось в 1961 г. и закончилось в 1964 г. Подпор от гидроузла распространяется вверх по р. Каме на 340 км до плотины Камской ГЭС. Площадь водосбора в створе Воткинского гидроузла составляет 184000 км² (ПИВР, 2016). Водохранилище представляет собой узкий вытянутый с северо-востока на юго-запад водоем со значительной

извилистостью, особенно в верхней и центральной частях. В подпоре от Воткинского гидроузла находятся реки Нытва, Тулва и Сайгатка. У плотины Воткинской ГЭС при НПУ максимальная ширина водохранилища составляет 8,23 км, глубина 22,8 м (Калинин, 2014).

Нижнекамское водохранилище – третья ступень каскада с расчетным напором 12,4 м. Гидроузел расположен в долине р. Камы у г. Набережные Челны (рис. 4). Наполнение Нижнекамского водохранилища началось в 1978 г., а закончилось в 1979 г. до отметки 62,00 м БС. Первый и второй гидроагрегаты Нижнекамской ГЭС были введены в эксплуатацию в 1979 г., последний 16-й агрегат – в 1987 г. Проектная отметка НПУ водохранилища равна 68,00 м БС, однако по ряду причин наполнение водохранилища не было завершено, и в настоящее время оно эксплуатируется на отметке НПУ – 63,30 м БС (ПИВР, 2014). Водоем отличается сложными очертаниями береговой линии и наличием обширных мелководий. В подпоре от Нижнекамского гидроузла находятся реки Буй, Белая, Иж, Ик и Челна. Максимальная ширина водохранилища при НПУ составляет 16 км, а глубина – 23,0 м. Для всех водохранилищ установлены характерные уровни воды, имеющие постоянные высотные отметки (табл. 9).

Таблица 9

**Характерные уровни водохранилищ камского каскада
(Правила использования..., 2014 и 2016)**

№ п/п	Наименование параметра	Камское	Воткинское	Нижнекамское
1	Нормальный подпорный уровень, НПУ (м БС)	108,50	89,00	63,30
2	Минимальный допустимый уровень (мертвого объема), УМО (м БС)	100,00	84,00	62,70
3	Уровень принудительной предполоводной сработки, УПС (м БС)	101,00	85,00	нет
4	Форсированные уровни при пропуске максимальных расходов вероятностью превышения, м БС:			
	0,01%	110,20/110,12*	90,00/89,89*	68,99
	0,1%	108,5	89,50/89,00*	66,93
5	Минимальный навигационный уровень, МНУ (м БС)	106,00	87,00	63,00

*в числителе приведен проектный ФПУ, в знаменателе – полученный по результатам гидравлических расчетов, выполненных при разработке «Правил использования...» (2016).

Как видно из табл. 9, наибольшая амплитуда хода уровня воды в течение года характерна для Камского водохранилища, а наименьшая – для Нижнекамского.

Морфометрические характеристики водохранилищ (табл. 10) являются важнейшими параметрами, которые не только определяют их форму и размеры, но и используются для классификации, расчетов и прогнозов элементов режима (Калинин, 2014).

Таблица 10

**Морфометрические показатели водохранилищ камского каскада
(Правила использования..., 2014 и 2016)**

№ п/п	Наименование параметра	Камское	Воткинское	Нижнекамское
1	Площадь зеркала при НПУ, км ²	1915	1120	1370
2	Площадь зеркала при УМО, км ²	550	775	1200
3	Объем водохранилища при УМО, км ³	2,37	4,91	3,44
4	Объем водохранилища при НПУ, км ³			
	полный	12,21	9,36	4,21
	Полезный	9,83	4,45	0,77
5	Объем водохранилища при ФПУ, км ³	15,77	10,46	–
6	Объем форсировки водохранилища (между отметками ФПУ и НПУ), км ³	3,56	1,10	–
7	Объем навигационной сработки водохранилища (между отметками НПУ и МНУ), км ³	4,16	2,00	–
8	Объем водохранилища при максимально допустимом уровне кратковременной форсировки, км ³			
	Полный	–	–	4,48
	полезный (между максимально допустимым уровнем кратковременной форсировки и УМО)	–	–	1,04

Анализ табл. 10 показал, что Камское водохранилище имеет наибольшие (при НПУ) площадь и объем среди водохранилищ камского каскада. Это обусловлено особенностями его морфологии и наличием крупных притоков.

3.2. Сезонные и многолетние изменения водности и уровня режима

Особенности многолетней динамики характеристик водного режима. На основе среднесуточных данных о притоке, расходе воды через

гидроузел, уровне воды в водохранилищах камского каскада выполнены расчеты их среднемесячных значений, и проведен анализ многолетних изменений (рис. 5).

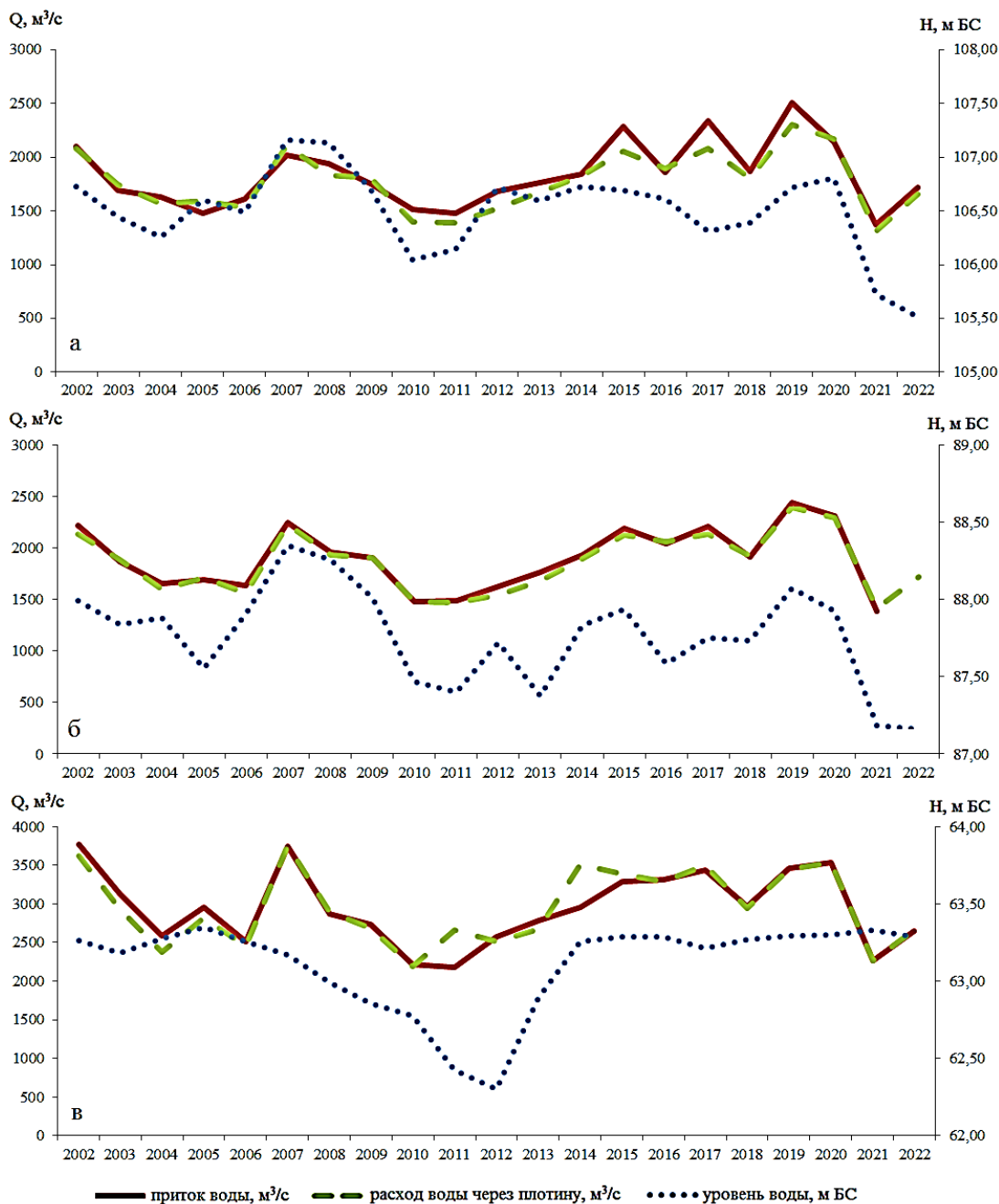


Рис. 5. Изменение притока к водохранилищу, расхода воды через ГЭС и уровня режима Камского (а), Воткинского (б) и Нижнекамского водохранилищ (в) за 2002-2022 годы

Камское и Воткинское водохранилища формируют сопряженный каскад ГЭС. Подпор от плотины Нижнекамской ГЭС распространяется до г. Сарапула, расположенного в 70 км ниже Воткинской ГЭС, поэтому каскад является разорванным. Анализ приходных и расходных составляющих водного баланса и

уровенного режима Воткинского водохранилища за многолетний период показал, что распределение этих характеристик практически полностью соответствует Камскому водохранилищу (рис. 8). Приток воды в Нижнекамское водохранилище поступает со стоком р. Камы, зарегулированной вышерасположенными Камским и Воткинским гидроузлами (60,2 %) и с боковой приточностью (39,8 %). Основную часть бокового притока составляет сток р. Белой, который частично зарегулирован Павловским водохранилищем на р. Уфе, Нугушским водохранилищем на р. Нугуш и Юмагузинским водохранилищем на р. Белой (Калинин и др., 2025).

Анализ изменения притока воды к водохранилищу, расхода воды через ГЭС и уровня режима показал, что распределение этих характеристик за многолетний период в целом соответствует Камскому и Воткинскому водохранилищам, но имеет некоторые особенности, которые сказались на выявлении многоводных и маловодных лет.

За период 2002-2022 гг. приток воды в водохранилища камского каскада в целом превышал расходы воды через гидроузлы. Для Камского водохранилища превышение притока воды над расходом наблюдалось в 70 % случаев, для Воткинского – в 60 %, а для Нижнекамского – в 75 %.

Как видно из рис. 4, максимальный приток и расход воды через ГЭС (около 2500 м³/с) на Камском и Воткинском водохранилищах наблюдался в 2017 и 2019 гг., а на Нижнекамском (3700 м³/с) – в 2002 г., что связано с большим боковым притоком по рекам Белой и Уфе. В 2021 г. отмечен самый минимальный приток и расход воды в водохранилищах камского каскада (Камское – 1370 м³/с, Воткинское – 1400 м³/с, Нижнекамское – 2270 м³/с).

В среднем за 20-летний период значение притока воды и расхода воды через Камскую ГЭС составило 1840 м³/с, через Воткинскую ГЭС – 1900 м³/с, а через Нижнекамскую ГЭС – 3000 м³/с, что практически соответствует значениям среднего по водности 2014 г. (Калинин и др., 2025).

Внутригодовое распределение притока воды, сброса через ГЭС и хода уровня воды в водохранилищах камского каскада за период с 2002 по 2022 гг. представлено на рис. 6.

Уровенный режим водохранилищ определяется соотношением элементов водного баланса, зависящих от условий формирования стока на водосборе, регулирующей роли Камского водохранилища и режима эксплуатации Камской, Воткинской и Нижнекамской ГЭС при их совместной работе в каскаде (Матарзин, 2003). Для Камского и Воткинского водохранилищ четко прослеживаются фазы весеннего наполнения, летне-осенней стабилизации и зимней сработки. На Нижнекамском водохранилище эти фазы выражены не столь явно, поскольку его годовая амплитуда колебания уровня воды не превышает 1,5 м. Внутри года значения уровней воды находятся в пределах проектных отметок, определенных «Правилами использования...» (ПИВР, 2014, 2016).

Основной приток Камское водохранилище получает во время весеннего половодья, поскольку реки рассматриваемой территории имеют преимущественно снеговое питание, на долю которого приходится 50-70 % годового стока. Период наполнения Камского и Воткинского водохранилищ до отметки НПУ начинается в середине апреля и заканчивается во второй половине мая. Средние значения притока воды и расхода через ГЭС в период наполнения составляют на Камском водохранилище – 3713 м³/с, на Воткинском – 3205 м³/с, на Нижнекамском – 5367 м³/с. Для последнего фаза наполнения начинается в марте, что обусловлено более ранним снеготаянием в связи с южным расположением водосбора. Наибольшие значения притока воды приходятся на май и в среднем составляют на Камском водохранилище – 7200 м³/с, на Воткинском – 5121 м³/с, на Нижнекамском – 6883 м³/с.

Фаза летне-осенней стабилизации водохранилищ камского каскада продолжается с июня до конца октября. Доля летне-осеннего стока рек составляет в среднем 25 % годового стока и мало меняется по территории. В соответствии с этим ГЭС работают преимущественно на бытовых расходах для обеспечения гарантированных судоходных глубин. Средние значения притока воды и расхода

через ГЭС составляют на Камском водохранилище – 1390 м³/с и 1426 м³/с, на Воткинском – 1506 м³/с и 1520 м³/с, на Нижнекамском – 2319 м³/с и 2262 м³/с соответственно (Калинин и др., 2025).

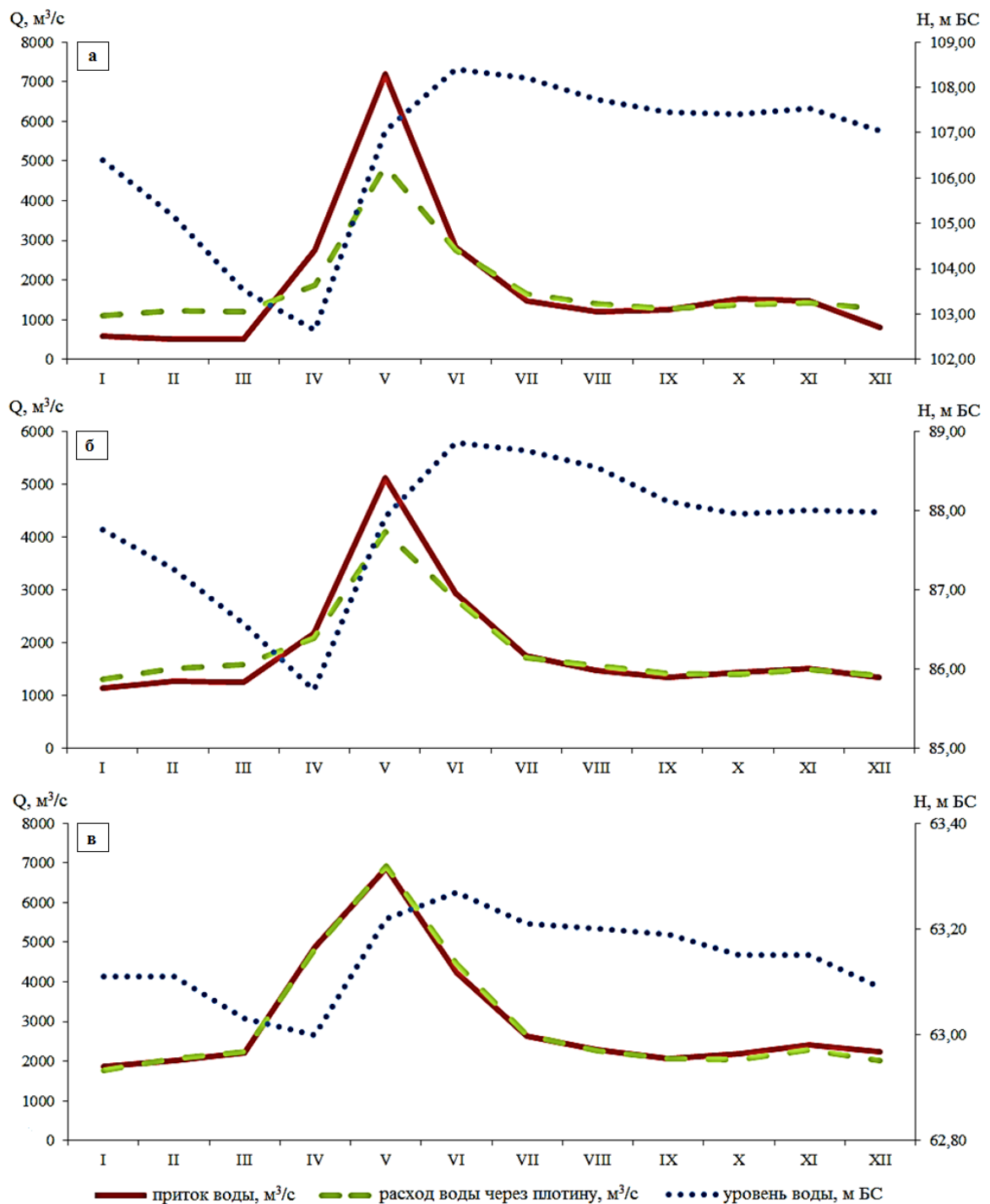


Рис. 6. Изменение средних значений притока к водохранилищу, расхода воды через ГЭС и уровня режима Камского (а), Воткинского (б) и Нижнекамского водохранилища (в) по месяцам за 2002-2022 годы

Зимнее понижение уровня воды в водохранилищах обычно начинается в конце октября – начале ноября. Зимняя межень на реках водосбора отличается устойчивостью, низким стоком и большой продолжительностью (140-160 дней). Доля зимнего стока рек составляет в среднем 15 % годового стока, поэтому в период зимней сработки средний расход воды через гидроузлы несколько превышает приток воды в водохранилища. В период зимней сработки приток воды и расход через ГЭС составляют на Камском водохранилище 600 м³/с и 1200 м³/с, на Воткинском – 1251 м³/с и 1447 м³/с, на Нижнекамском – 2085 м³/с и 2015 м³/с соответственно (Калинин и др., 2025).

Особенности внутригодового распределения характеристик водного режима в годы разной водности. Для оценки внутригодового распределения притока воды, расхода через ГЭС и хода уровня воды в разные фазы водного режима из 20-ти летнего ряда наблюдений были выбраны характерные по водности годы: средний – 2014 г., маловодный – 2021 г. и многоводные – 2017 г. и 2019 г. (рис. 7-9). Выбор двух многоводных лет обусловлен особенностями внутригодового распределения исследуемых характеристик. Так, 2017 г. отличался высоким весенним половодьем с продолжительным периодом спада за счет наложения волн дождевых паводков со второй половины мая и до середины июля, а в 2019 г. высокие дождевые паводки наблюдались в течение всего летне-осеннего периода. Это привело к тому, что впервые за всю историю существования Камской ГЭС для поддержания уровня водохранилища в пределах НПУ затворы водосбросов открывались даже в ноябре (рис. 7).

Для выбранных лет выполнены расчеты объемов поступления воды, ее сбросов через ГЭС, а также отношения притока и сброса в периоды весеннего наполнения, летне-осенней стабилизации и зимней сработки (табл. 11) (Калинин и др., 2025). Анализ таблицы 11 показал, что в период весеннего наполнения наибольшее отношение притока воды в водоем и сброса через ГЭС характерно для Камского водохранилища. Установлено, что это отношение является наименьшим для многоводных лет (1,3-1,5) и наибольшим для маловодного года (1,7), а в средний по водности год составляет 1,5. На Воткинском водохранилище эта закономерность сохраняется для многоводных лет, а в маловодный год значения совпадают со средним по водности годом (табл. 11).

Для Нижнекамского водохранилища отношение притока воды и сброса через ГЭС в период весеннего наполнения в годы разной водности практически одинаково – 1,0-1,1.

В период летне-осенней стабилизации уровня воды отношение притока воды и сброса через ГЭС в водохранилищах Камского каскада составляет в среднем 1,0, уменьшаясь в маловодный год до 0,8-0,9.

В период зимней сработки отношение притока воды к сбросу через ГЭС не зависит от водности года, но увеличивается по длине камского каскада, что связано с разной величиной полезного объема водохранилищ (табл. 11). Для Камского водохранилища характерен наибольший полезный объем – 9,83 км³, при П/С=0,5. Для Воткинского водохранилища полезный объем почти в два раза меньше – 4,45 км³, при П/С=0,8. У Нижнекамского водохранилища полезный объем составляет 0,77 км³, при П/С=0,9, что подтверждает транзитный характер работы водоема (табл. 11) (Калинин и др., 2025).

Таблица 11

Объемы поступления воды и ее сброса через ГЭС в водохранилища камского каскада в годы разной водности

Водохранилище	Фазы работы ГЭС									Всего за год		
	Наполнение			Стабилизация			Сработка					
	П*, км ³	С*, км ³	П/С	П, км ³	С, км ³	П/С	П, км ³	С, км ³	П/С	П, км ³	С, км ³	П/С
2014 г.												
Камское	31,5	20,6	1,5	16,2	16,0	1,0	10,6	21,0	0,5	58,4	57,6	1,0
Воткинское	23,4	18,7	1,3	16,2	17,3	0,9	21,3	23,7	0,9	61,0	59,7	1,0
Нижнекамское	36,2	33,5	1,1	24,1	29,8	0,8	33,2	36,4	0,9	93,5	99,7	0,9
2017 г.												
Камское	49,1	36,5	1,3	18,4	16,9	1,1	6,6	12,6	0,5	74,1	66,0	1,1
Воткинское	39,4	34,5	1,1	18,4	17,9	1,0	12,1	14,9	0,8	69,9	67,4	1,0
Нижнекамское	60,2	58,4	1,0	28,1	27,8	1,0	20,9	24,5	0,9	109,2	110,7	1,0
2019 г.												
Камское	30,7	20,8	1,5	44,5	41,3	1,1	4,3	10,7	0,4	79,5	72,8	1,1
Воткинское	22,8	18,3	1,2	44,0	43,2	1,0	10,2	14,2	0,7	77,0	75,6	1,0
Нижнекамское	30,4	27,8	1,1	59,4	57,7	1,0	19,9	23,5	0,8	109,7	109,0	1,0
2021 г.												
Камское	24,3	14,1	1,7	13,1	16,4	0,8	6,4	11,1	0,6	43,9	41,5	1,1
Воткинское	15,9	12,1	1,3	16,1	18,3	0,9	11,9	14,1	0,8	43,9	44,5	1,0
Нижнекамское	26,1	26,0	1,0	23,2	24,8	0,9	22,1	20,7	1,1	71,5	71,4	1,0

«П» – приток воды в водохранилище; «С» – сброс воды из водохранилища

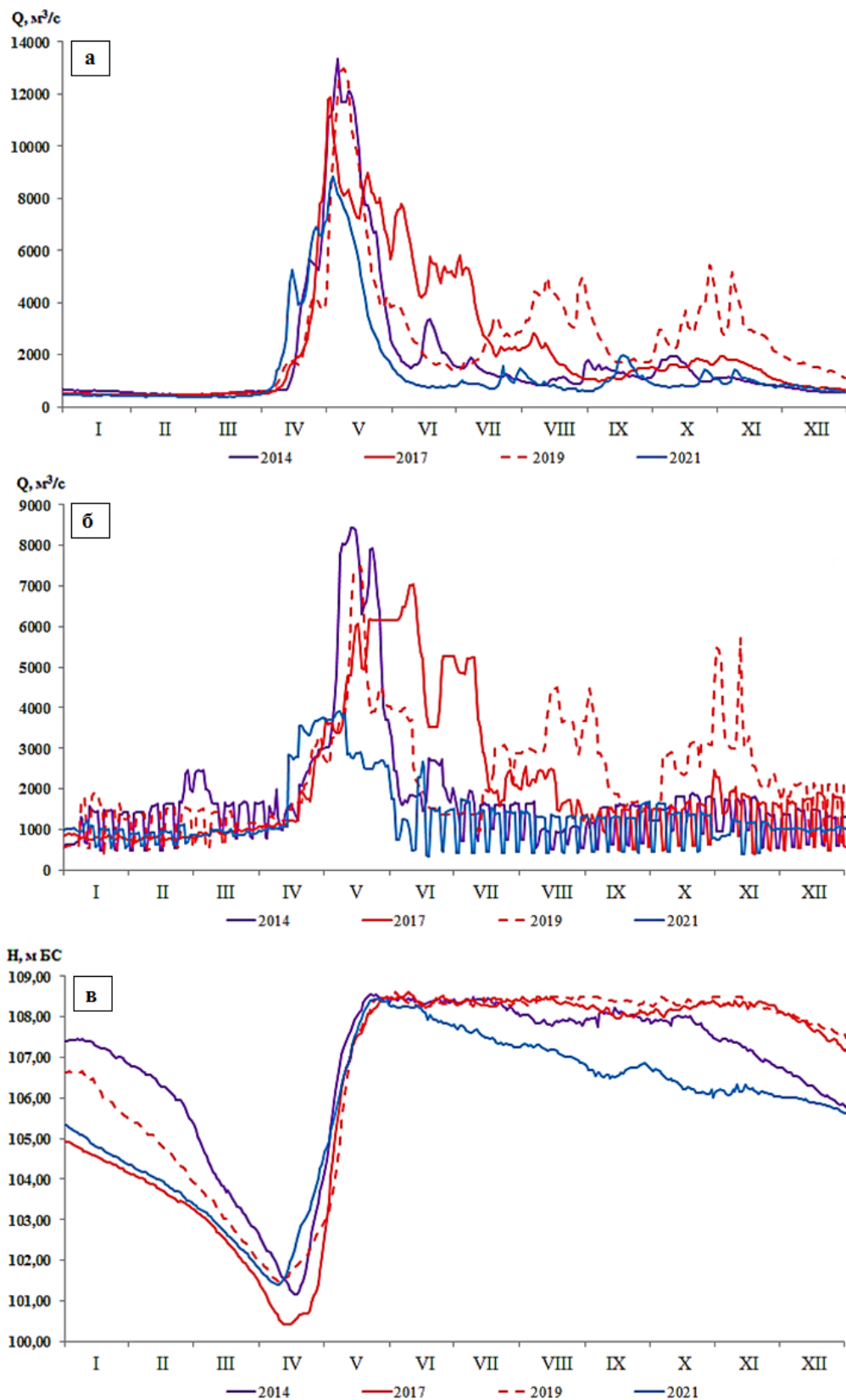


Рис. 7. Внутригодовое распределение приходных (а) и расходных (б) составляющих водного баланса и уровня режима (в) Камского водохранилища за средний по водности 2014 г., многоводные 2017 и 2019 годы, и маловодный 2021 г.

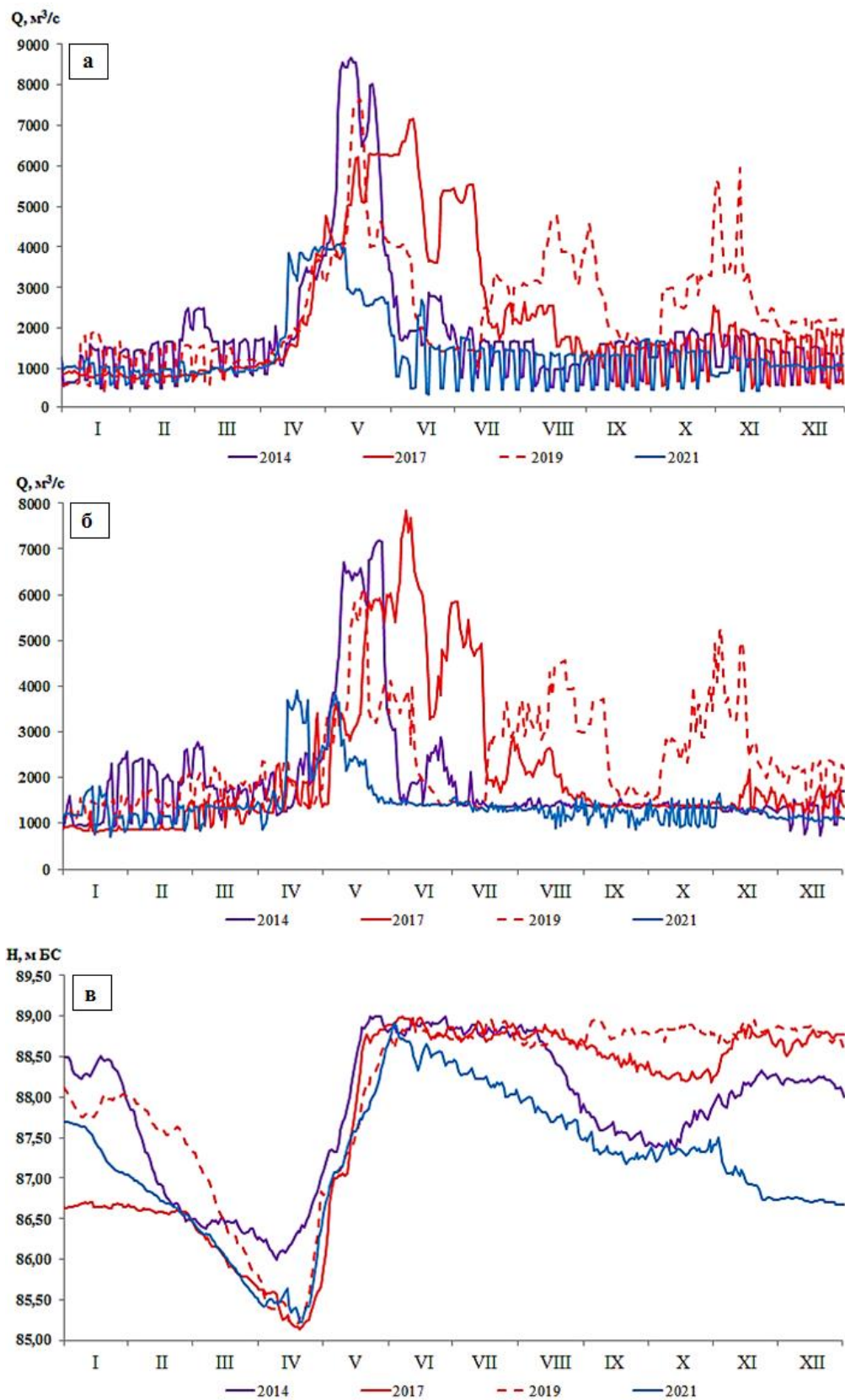


Рис. 8. Внутригодовое распределение приходных (а) и расходных (б) составляющих водного баланса и уровня режима (в) Воткинского водохранилища за средний по водности 2014 г., многоводные 2017 и 2019 годы, и маловодный 2021 г.

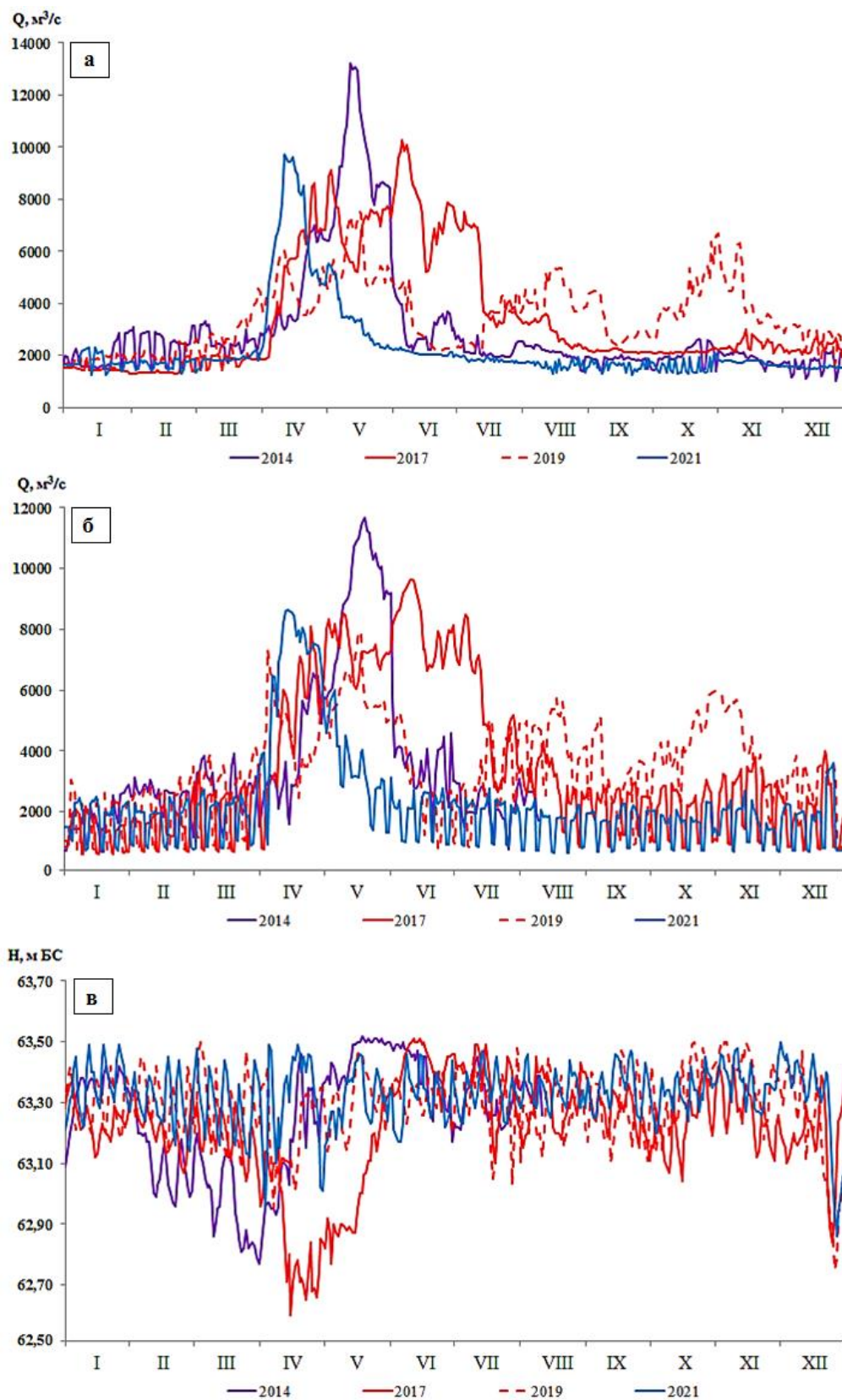


Рис. 9. Внутригодовое распределение приходных (а) и расходных (б) составляющих водного баланса и уровня режима (в) Нижнекамского водохранилища за средний по водности 2014 г., многоводные 2017 и 2019 годы, и маловодный 2021 г.

Расчеты отклонения величины притока воды от среднего по водности 2014 г. в водохранилищах камского каскада показали, что приток в многоводный 2019 г. на 26,5 % больше, а в маловодный 2021 г. – на 25,4 % меньше по сравнению со средним по водности годом. Для величины сброса воды через ГЭС эти отклонения составили 20,8 % и 27,3 % соответственно (табл. 12).

В средний по водности 2014 г. наполнение водохранилищ началось в апреле, а закончилось в середине мая. Так, в начале апреля уровни воды стали повышаться на Нижнекамском водохранилище, в первой декаде месяца – на Воткинском, и в середине месяца – на Камском. До второй декады мая Нижнекамское водохранилище работало на транзитном стоке, сбрасывая почти всю поступающую с Воткинской ГЭС воду через гидроузел (рис. 7-9) (Калинин и др., 2025).

В период летне-осенней стабилизации значения притока воды и сброса через ГЭС мало отличались друг от друга, составляя в среднем: для Камского водохранилища – 1428 м³/с, Воткинского – 1486 м³/с, Нижнекамского – 2388 м³/с. В период зимней сработки для Камского и Воткинского водохранилищ соотношение притока воды и сброса через ГЭС значительно варьируются. Для регулятора каскада – Камского водохранилища, питающегося естественным речным стоком, значения притока в среднем составили 689 м³/с, а стока через ГЭС – 1338 м³/с. Это связано с режимом его регулирования, а именно наличием фазы глубокой (до 7,5 м) зимней сработки. В отличие от Камского приток к Воткинскому водохранилищу практически полностью (до 96 %) обеспечивался расходами через Камскую ГЭС. Воткинское водохранилище в этот период осуществляло транзит стока со сравнительно небольшой (около 3 м) зимней сработкой уровня воды. Приток и сброс воды через Воткинскую ГЭС составил в среднем 1447 м³/с (Калинин и др., 2025).

Внутригодовое распределение приходных и расходных составляющих водного баланса в **маловодный 2021 г.** практически не отличался от года средней водности (рис. 7-9). Во второй половине апреля практически весь приток, сбрасываемый через Камскую ГЭС, поступал транзитом в Воткинское

и Нижнекамское водохранилища. В период наполнения приток и сброс воды через ГЭС составил: на Камском водохранилище – 4204 м³/с и 2764 м³/с, на Воткинском – 2754 м³/с и 2382 м³/с, на Нижнекамском – 4511 м³/с и 5090 м³/с соответственно, что значительно меньше (приток – на 27,5 %, сброс – на 29,7 %), чем в средний по водности 2014 г.

В период летне-осенней стабилизации приток воды и расход через ГЭС были в среднем на 5,4 % меньше, чем в 2014 г., и составили на Камском водохранилище 976 м³/с и 1129 м³/с, на Воткинском 1184 м³/с и 1260 м³/с, на Нижнекамском 1713 м³/с и 1706 м³/с. В период зимней сработки приток и расход воды через ГЭС в среднем составили на Камском водохранилище – 528 м³/с и 927 м³/с, на Воткинском – 974 м³/с и 1183 м³/с, на Нижнекамском – 1816 м³/с и 1734 м³/с, что на в среднем на 41,3 % ниже, чем в 2014 г. (Калинин и др., 2025).

Таблица 12

Отклонение величины притока воды и сброса через ГЭС от среднего по водности года в водохранилищах камского каскада

Водохранилище	Отклонение величины притока воды от среднего по водности года, %			Отклонение величины сброса воды от среднего по водности года, %		
	2017	2019	2021	2017	2019	2021
Наполнение						
Камское	55,9	-2,7	-22,7	77,1	0,9	-31,6
Воткинское	68,4	-2,6	-31,9	84,7	-2,4	-35,1
Нижнекамское	66,4	-15,9	-27,9	74,4	-17,0	-22,5
Стабилизация						
Камское	13,6	174,7	-19,1	5,9	158,2	2,4
Воткинское	13,6	171,5	-0,9	3,6	149,4	5,7
Нижнекамское	16,7	146,3	-3,6	-6,7	93,6	-16,9
Сработка						
Камское	-37,7	-59,4	-39,3	-40,1	-49,2	-47,3
Воткинское	-43,2	-52,0	-44,3	-37,0	-40,0	-40,5
Нижнекамское	-37,1	-40,1	-33,3	-32,8	-35,4	-43,2
За год						
Камское	26,9	36,1	-24,8	14,6	26,4	-28,0
Воткинское	14,6	26,2	-28,0	12,9	26,6	-25,5
Нижнекамское	16,8	17,3	-23,5	11,0	9,3	-28,4

Многоводный 2017 г. отличался высоким и продолжительным притоком через Камскую ГЭС в нижерасположенные водохранилища каскада с начала мая по середину июля, что обусловлено не только весенним половодьем, но и наложением волны паводков в начале лета (см. рис. 6-8). В период летне-осенней стабилизации значения суммарного притока воды и сброса через ГЭС в среднем составили на Камском водохранилище 1596 м³/с, на Воткинском – 1644 м³/с, на Нижнекамском – 2529 м³/с. Зимняя сработка на Камском водохранилище началась в конце ноября, при снижении величины ежедневного притока в среднем до 1500 м³/с. Незначительное увеличение сброса воды через Камскую ГЭС в начале ноября привело к повышению уровня воды в Воткинском водохранилище на 0,50 м, который оставался стабильным до конца года (рис. 7-9) (Калинин и др., 2025).

Отдельно следует сказать про 2019 г. (рис. 7-9). Он являлся аномальным с точки зрения регулирования стока, поскольку впервые за всю историю существования Камской ГЭС для поддержания уровня водохранилища в пределах НПУ затворы водосбросов открывались даже в ноябре. Яркой отличительной чертой этого года явился очень дождливый и относительно теплый летне-осенний сезон. Продолжительные дождевые паводки обусловили стабильное стояние уровня воды на отметках, близких к НПУ и значительную величину притока и расхода воды через ГЭС, которая в среднем на Камском водохранилище составила 2588 м³/с, на Воткинском – 2626 м³/с, на Нижнекамском – 3578 м³/с. При таком режиме работы каскада почти не наблюдалось недельного регулирования стока, типичного для Камского и Воткинского водохранилищ. На Нижнекамском водохранилище недельное регулирование стока четко прослеживалось на протяжении всего года, за исключением весеннего периода.

Отличия хода уровня воды в годы разной водности проявляются в глубине предполоводной сработки и продолжительности фазы стабилизации. Так, в средний по водности 2014 г. отметка уровня воды перед весенним наполнением на Камском водохранилище составила 101,21 м БС, на

Воткинском – 86,04 м БС, а на Нижнекамском – 62,77 м БС.

В маловодный 2021 г. отметка уровня воды перед весенним наполнением на Камском водохранилище была выше, чем в средний по водности год, и составляла 101,50 м БС, а на Воткинском – 85,22 м БС. В фазу летне-осенней стабилизации уровни воды снизились на Камском водохранилище до отметки 106,50 м БС, на Воткинском – до 87,23 м БС. Осень характеризовалась наличием трех незначительных дождевых паводков, однако общая тенденция к снижению уровня воды продолжилась. Уровень воды на Нижнекамском водохранилище на протяжении всего года держался практически на одной отметке 63,30 м БС (Калинин и др., 2025).

В многоводный 2017 г. Камское водохранилище готовили к большому притоку воды в период весеннего половодья, поэтому отметка уровня воды перед наполнением была наименьшей за весь исследуемый период, и составила 100,55 м БС. На Воткинском – 85,16 м БС, а на Нижнекамском – 62,60 м БС. На всех водохранилищах каскада высокие уровни в многоводные 2017 и 2019 годы сохранялись в течение всего периода летне-осенней стабилизации. Однако для 2017 г. это было обусловлено большим притоком в период половодья, а для 2019 г. – значительными летне-осенними дождевыми паводками.

Таким образом, многолетние изменения приходных и расходных составляющих водного баланса и уровня воды камских водохранилищ определяются естественным речным стоком с одной стороны и регламентом каскадного регулирования с другой. Камское водохранилище является регулятором каскада. Приток к Воткинскому водохранилищу полностью зависит от сбросов воды через Камскую ГЭС, а расход воды определяется регламентом работы Воткинского гидроузла. На Нижнекамском водохранилище водный режим отражает сложный характер совместной работы водохранилищ камского каскада, а также зарегулированной боковой приточности рек Белой и Уфы (Калинин и др., 2025).

Уровенный режим Камского и Воткинского водохранилищ включает в себя фазы весеннего наполнения, летне-осенней стабилизации и зимней сработки. На Нижнекамском водохранилище эти фазы практически отсутствуют, а в характере притока и сброса четко прослеживается недельное регулирование стока.

Фаза весеннего наполнения Камского и Воткинского водохранилищ начинается в середине апреля и заканчивается во второй половине мая. Наполнение Нижнекамского водохранилища начинается в марте, что обусловлено более ранним снеготаянием, в связи с южным расположением водосбора. Фаза летне-осенней стабилизации водохранилищ камского каскада наблюдается в июне-октябре. Зимнее понижение уровня воды в водохранилищах обычно проходит в период с начала ноября до середины апреля.

Внутригодовое распределение приходных и расходных составляющих водного баланса в маловодные и средние по водности годы имеет схожий характер. Основные отличия внутригодового распределения этих характеристик в многоводные годы проявляются в высоком весеннем притоке и наложении волн дождевых паводков, которые обуславливают продолжительное стояние уровня воды на отметках, близких к НПУ в период летне-осенней стабилизации, и повышенный сброс воды через гидроузлы в течение всего года.

4. Пространственно-временная изменчивость гидролого-геохимических характеристик водохранилищ Камского каскада

4.1. Изменение концентраций загрязняющих веществ

Биогенные вещества поступают в Камские водохранилища со сбросами сточных вод предприятий, в виде выноса биогенных веществ с сельскохозяйственных угодий и за счет ведения животноводства. Анализ расчетов поступления биогенных веществ со сбросами сточных вод предприятий показал, что большая часть веществ попадает в основном в Камское водохранилище – 51 % (табл. 13). В два раза меньше сточных вод, содержащих биогенные вещества, попадает в Воткинское (25 %) и Нижнекамское (24 %) водохранилища (Микова и др., 2025).

Азот общий – это сумма органических (белковых, мочевиновых) и минеральных (аммонийной, нитратной, нитритной) форм азота. Анализ данных АИС ГМВО (<https://gmvo.skniivh.ru/>) за 2010-2021 гг. показал, что наибольшее количество азота общего поступает в Камское водохранилище со сбросами сточных вод предприятий – 38 399 т/год, что составляет 70 % от величины общего поступления в Камские водохранилища. На водосборе Камского водохранилища находится много крупных заводов (биохимические, коксохимические, химические и электросварочного оборудования), предприятия пищевой промышленности, предприятия ЖКХ, целлюлозно-бумажные комбинаты и т.д. (Микова и др., 2025).

Поступление нитрат-аниона в абсолютных значениях наибольшее среди биогенных веществ по всем водохранилищам – 64370–105467 т/год. Большая часть нитрат-аниона поступает в Камское водохранилище (42 %). Нитрит-анионов со сточными водами в воды Камских водохранилищ поступает меньше – 428-3988 т/год. Большая часть стоков также приходится на Камское водохранилище (72 %). Фосфаты относительно других биогенных веществ поступают более равномерно, годовые сбросы изменяются от 1913 до 3286

т/год. Больше всего фосфатов со сточными водами поступает в Воткинское водохранилище (43 %), меньше – в Нижнекамское (25 %). Химическая, сельскохозяйственная и пищевая промышленность являются основными источниками фосфора и его соединений в сточных водах. Порядка 90 % поступления железа со сточными водами приходится на Камское водохранилище. Железо в значительном количестве переносится сточными водами предприятий металлообрабатывающей, металлургической, лакокрасочной и текстильной промышленности. Помимо этого, источниками соединений железа в природных водах являются процессы растворения и химического выветривания горных пород, поступление вод с подземным стоком и стоком с сельскохозяйственных территорий (Микова и др., 2025).

Таблица 13

Количество биогенных веществ поступающих со сбросами сточных вод предприятий в камские водохранилища с 2010 по 2022 гг. (по данным АИС ГМВО)

Биогенные вещества	Водохранилища					
	Камское		Воткинское		Нижнекамское	
	Тонны	%	тонны	%	тонны	%
Азот общий	38399	70	15184	28	–	–
Аммоний-ион	4481	78	656	11	616	11
Нитрат-анион	105467	42	64370	26	79059	32
Нитрит-анион	3988	72	1103	20	428	8
Фосфаты	2365	31	3276	44	1913	25
Железо	5772	90	408	6	225	4

Для азота общего и фосфатов выполнено сравнение величин, движущихся из разных источников (табл. 14). Вынос биогенных веществ со сточными водами предприятий рассчитан за период 2010-2022 гг., с сельскохозяйственных угодий и от животноводства – по данным на 2008 и 2009 гг. соответственно. Масса выноса биогенных веществ с сельскохозяйственных угодий рассчитана для водохранилищ на основе данных по водохозяйственным участкам, представленным в (Фащевская, 2023), с учетом вида сельхозугодий, содержания биогенных веществ в почвах, количества вносимых удобрений и слоя стока в период весеннего половодья и дождевых паводков. Данные расчеты позволяют учесть вынос биогенных веществ только с жидким стоком, хотя они попадают в водохранилища и с частицами почвы при эрозионных процессах на склоновых землях. Вынос

биогенных веществ за счет ведения животноводства рассчитан по данным водохозяйственных участков, представленных в (Фащевская, 2023), где для ориентировочной оценки влияния животноводства на поверхностные воды проведен расчет количества образующихся отходов в переводе на азот и фосфор. На Камском и Воткинском водохранилищах наибольшее поступление азота общего и фосфатов происходит за счет сброса сточных вод в водные объекты. Поскольку площадь сельхозугодий на водосборах Камского и Воткинского водохранилищ небольшая – 15 и 5 % соответственно, то и величина азота общего и фосфатов минимальна (5–12 %) (табл. 14).

Таблица 14

Количество азота общего и фосфатов в % от суммы веществ, поступающих в камские водохранилища

Источники	Камское		Воткинское		Нижекамское	
	Азот общий	Фосфаты	Азот общий	Фосфаты	Азот общий	Фосфаты
Поступление со сточными водами предприятий	70	31	28	43	–	26
Поступление с сельхозугодий*	12	8	6	5	82	87
Поступление от животноводства*	8	8	5	5	87	87
Всего:	27	9	12	7	61	84

Примечание: * – по данным водохозяйственных участков в СКИОВО (2014); «–» данные отсутствуют

Наибольшее поступление азота общего и фосфатов от всех источников на Нижекамском водохранилище – 61 и 84 % соответственно. Здесь сосредоточены обширные площади сельскохозяйственных угодий – 105357 км², что составляет 79 % от общей площади всех сельскохозяйственных полей на водосборе Камских водохранилищ. Также на территории водосбора Нижекамского водохранилища находится самое большое поголовье крупного рогатого скота, свиней, овец, коз, лошадей и птицы (Фащевская, 2023), поэтому величина поступления азота общего здесь наибольшая (87 %) среди водохранилищ Камского каскада. Проникновение биогенных веществ со сточными водами предприятий на территории Нижекамского

водохранилища незначительное и составляет всего 2 % от всех точечных сбросов, попадающих в Камские водохранилища (Микова и др., 2025).

Прежде чем давать оценку сезонных величин концентраций биогенных веществ водохранилищ Камского каскада, необходимо выполнить верификацию материалов ведомственного мониторинга КамБВУ с данными гидрохимических ежегодников (рис. 10). Информация о концентрациях загрязняющих веществ в них приводится для конкретного водохранилища в целом за год. Анализ рис. 10 показал, что значения концентраций различаются незначительно. Величины средних многолетних концентраций биогенных веществ по материалам мониторинга Камского БВУ несколько ниже, чем данные ежегодников качества поверхностных вод РФ. Это может быть обусловлено разным периодом осреднения. Наибольшие расхождения характерны для Камского водохранилища, где значения концентрации аммоний-иона ниже на 0,16, а железа общего – на 0,19 мг/л (Микова и др., 2025).

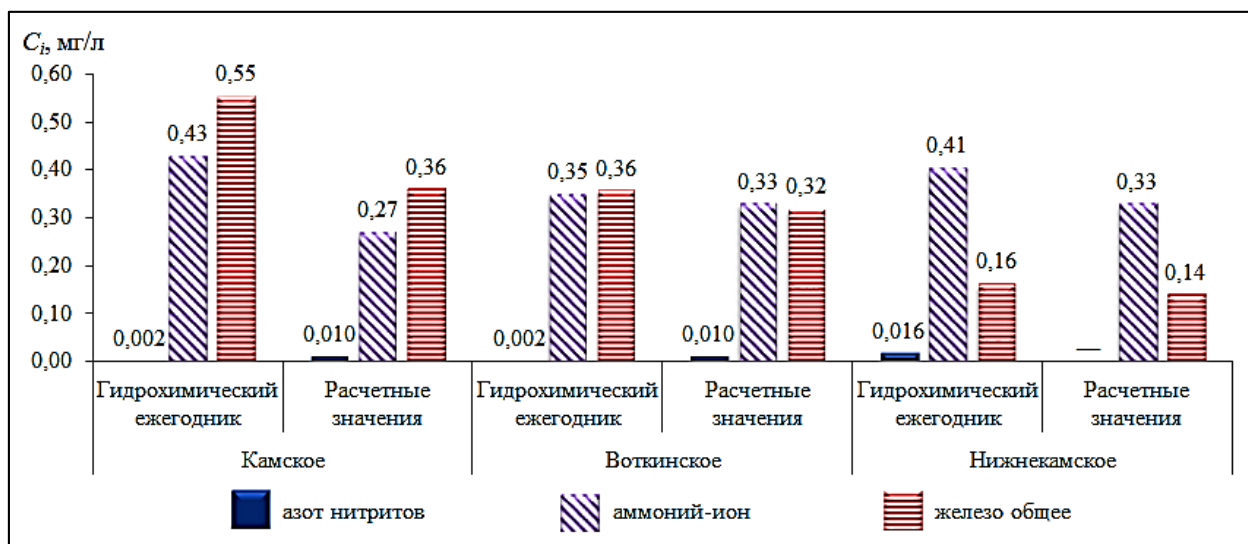


Рис. 10. Средние многолетние концентрации биогенных веществ в водохранилищах Камского каскада по материалам ежегодников качества поверхностных вод РФ (за 2010–2022 гг.) и по материалам КамБВУ (за 2005–2022 гг.)

При этом данные, приведенные в ежегодниках (<https://gidrohim.com>), не позволяют судить о концентрациях таких биогенных веществ, как нитраты,

нитриты и фосфат-ионы, а также не дают представление о сезонных величинах их концентраций.

Характеристика стока биогенных веществ в разные сезоны по длине Камских водохранилищ.

Анализ концентраций биогенных веществ в воде Камских водохранилищ, осредненных по сезонам водности, показал, что наибольшие концентрации аммоний-иона наблюдаются в весенний период – фазу максимальной водности (табл. 16). На Камском и Воткинском водохранилищах максимальный сброс биогенных веществ поступает с промышленных предприятий, а на Нижнекамском водохранилище – с сельскохозяйственных земель во время снеготаяния. На Камском водохранилище наименьшие из средних концентраций аммоний-иона (0,14 мг/л) наблюдаются в период летне-осенней стабилизации, когда наполнение водохранилищ близко к НПУ. В период зимней сработки концентрации данного вещества увеличиваются и в период весеннего наполнения достигают наибольших значений (табл. 16). На Воткинском водохранилище сезонные концентрации аммоний-иона (0,21–0,41 мг/л) изменяются так же, как и на Камском водохранилище (Микова и др., 2025).

Максимальную сельскохозяйственную нагрузку испытывает водосбор Нижнекамского водохранилища, где расположены обширные площади сельскохозяйственных угодий и большое поголовье крупного рогатого скота. Самые значительные концентрации средних по сезонам величин аммоний-иона наблюдались во все сезоны, но чаще всего в период весеннего наполнения (табл. 16). В данный сезон содержание аммоний-иона составляло 0,35 мг/л.

Высокие концентрации нитратов и нитритов на Камском и Нижнекамском водохранилищах отмечаются при наименьших объемах воды – в периоды зимней сработки и весеннего наполнения. В период летне-осенней стабилизации концентрации нитратов наименьшие (0,34–1,15 мг/л). На Воткинском водохранилище нитраты и нитриты имеют наибольшие концентрации в разные сезоны: нитратов больше в период зимней сработки

(1,65 мг/л), нитритов – в период летне-осенней стабилизации (0,012 мг/л) (Микова и др., 2025).

Минимальные концентрации фосфатов на всех водохранилищах Камского каскада наблюдаются в период весеннего наполнения (0,017–0,022 мг/л) и летне-осенней стабилизации (0,018–0,025 мг/л) (табл. 15). Низкие концентрации фосфатов можно объяснить высоким потреблением фосфора водными растениями в период вегетации. Максимум концентраций фосфатов на всех водохранилищах Камского каскада отмечен в период зимней сработки (0,026–0,031 мг/л). Это происходит из-за отмирания низшей водной растительности и прекращения потребления фосфатов высшей водной растительностью вследствие низких температур воды и отсутствия солнечного света.

Анализ сезонного изменения железа общего на Камском водохранилище показал, что наибольшие концентрации отмечаются в период зимней сработки. В период весеннего наполнения концентрации железа в Камском водохранилище снижаются (0,42 мг/л) и достигают наименьших значений (0,18 мг/л) в период летне-осенней стабилизации (табл. 15). Такое снижение концентраций происходит из-за того, что в весенний период в водохранилище с водосбора поступает большой объем пресной воды от снеготаяния. Весенний период включает в себя три месяца: апрель, май и июнь. В апреле и начале мая происходит сработка Камского водохранилища, которой соответствуют высокие концентрации железа, поступающего с грунтовым питанием и стоком с болот Верхней Камы (естественный природный фон). Далее начинается наполнение водохранилища талыми водами. Поэтому средние концентрации железа за период весеннего наполнения выше, чем в период летне-осенней стабилизации уровня воды, когда водохранилище полностью наполнено водами, поступившими от снеготаяния. В целом, на Камском водохранилище концентрации железа выше (0,18–0,47 мг/л), чем на нижерасположенных водохранилищах каскада (0,11–0,41 мг/л) (Микова и др., 2025).

На Воткинском и Нижнекамском водохранилищах наибольшие концентрации железа наблюдались в период весеннего наполнения (0,41 и 0,18 мг/л соответственно). В этот период воды вышерасположенного Камского водохранилища в результате сработки интенсивно поступают в нижележащие водохранилища каскада, увеличивая зимние концентрации железа. В последующий период летне-осенней стабилизации концентрации железа на Воткинском и Нижнекамском водохранилищах наименьшие. Превышений ПДКр.х. (табл. 15) по биогенным веществам нет, за исключением железа общего. Во все сезоны концентрации железа превышают ПДКр.х. в 1,1–4,7 раза.

Таблица 15

Сезонные величины концентрации биогенных веществ (мг/л) на камских водохранилищах

Показатель	ПДК	Водохозяйственные сезоны		
		Зимняя сработка	Весеннее наполнение	Летне-осенняя стабилизация
Камское водохранилище				
Азот нитритов	0,02	0,010	0,010	0,010
Аммоний-ион	0,50	0,32	0,35	0,14
Нитраты	40	1,03	1,30	0,34
Нитриты	0,08	0,007	0,012	0,006
Фосфаты	0,20	0,031	0,017	0,018
Железо общее	0,10	0,47	0,42	0,18
Воткинское водохранилище				
Азот нитритов	0,02	0,010	0,010	0,010
Аммоний-ион	0,50	0,37	0,41	0,21
Нитраты	40	1,65	1,46	0,42
Нитриты	0,08	0,009	0,011	0,012
Фосфаты	0,20	0,028	0,022	0,021
Железо общее	0,10	0,39	0,41	0,15
Нижнекамское водохранилище				
Азот нитритов	0,02	нет данных	нет данных	нет данных
Аммоний-ион	0,50	0,32	0,35	0,33
Нитраты	40	2,30	2,43	1,15
Нитриты	0,08	0,025	0,030	0,028
Фосфаты	0,20	0,026	0,018	0,025
Железо общее	0,10	0,12	0,18	0,11

Примечание: **полужирным шрифтом** выделены величины, превышающие ПДК

От верховьев Камского водохранилища к плотине Нижнекамского гидроузла концентрации аммоний-иона и железа общего снижаются (рис. 11).

Концентрация аммоний-иона снижается в 2 раза, а железа общего – в 10 раз по мере удаления от источника поступления. Затем отмечается небольшой рост концентраций аммоний-иона на Нижнекамском водохранилище до 0,38 мг/л, в основном за счет притока биогенных веществ от предприятий сельского хозяйства и животноводства. Содержание в воде нитратов и нитритов имеет схожую динамику – рост от верхних участков Камского водохранилища к плотине Нижнекамского гидроузла с локальными пиками в районе г. Перми. В целом их концентрации увеличиваются в 5–6 раз. На верхних участках каскада концентрации нитратов невелики и составляли 0,35–0,50 мг/л (д. Пыскор, пос. Керчевский), а к плотине Нижнекамского гидроузла увеличиваются до 2,39 мг/л у д. Усть-Бельск. Фосфаты имеют высокие концентрации на верхнем участке Камского водохранилища (0,03 мг/л), несколько снижаются в центральной части (0,015 мг/л), затем снова увеличиваются в районе г. Перми (0,031 мг/л). На Воткинском водохранилище концентрации фосфатов растут к приплотинному участку Воткинской ГЭС (0,022–0,023 мг/л) (Микова и др., 2025).

Если рассматривать изменения значений превышений ПДКр.х. железа по длине водохранилищ, то следует отметить, что среднегодовые превышения концентраций ПДКр.х. снижаются по длине каскада: с 9,7 ПДКр.х. на участке, расположенном выше Камского водохранилища (пос. Керчевский), где столь высокое содержание железа обусловлено естественным природным фоном, до 6,4 ПДКр.х. (д. Пыскор) в районе Березниковско-Соликамского промузла. Ниже данного участка также происходит существенное снижение концентраций железа в водах Камского водохранилища. Так, у д. Пахнино (ниже центральной части Камского водохранилища) концентрации составляют уже 3,8 ПДКр.х., несмотря на значительное техногенное воздействие на сток, связанное с разливами воды из ликвидированных шахт Кизеловского угольного бассейна. Далее вниз по каскаду концентрации продолжают снижаться и достигают наименьших значений на Нижнекамском водохранилище (0,9 ПДКр.х. у с. Каракулино и д. Усть-Бельск) (Микова, 2025).

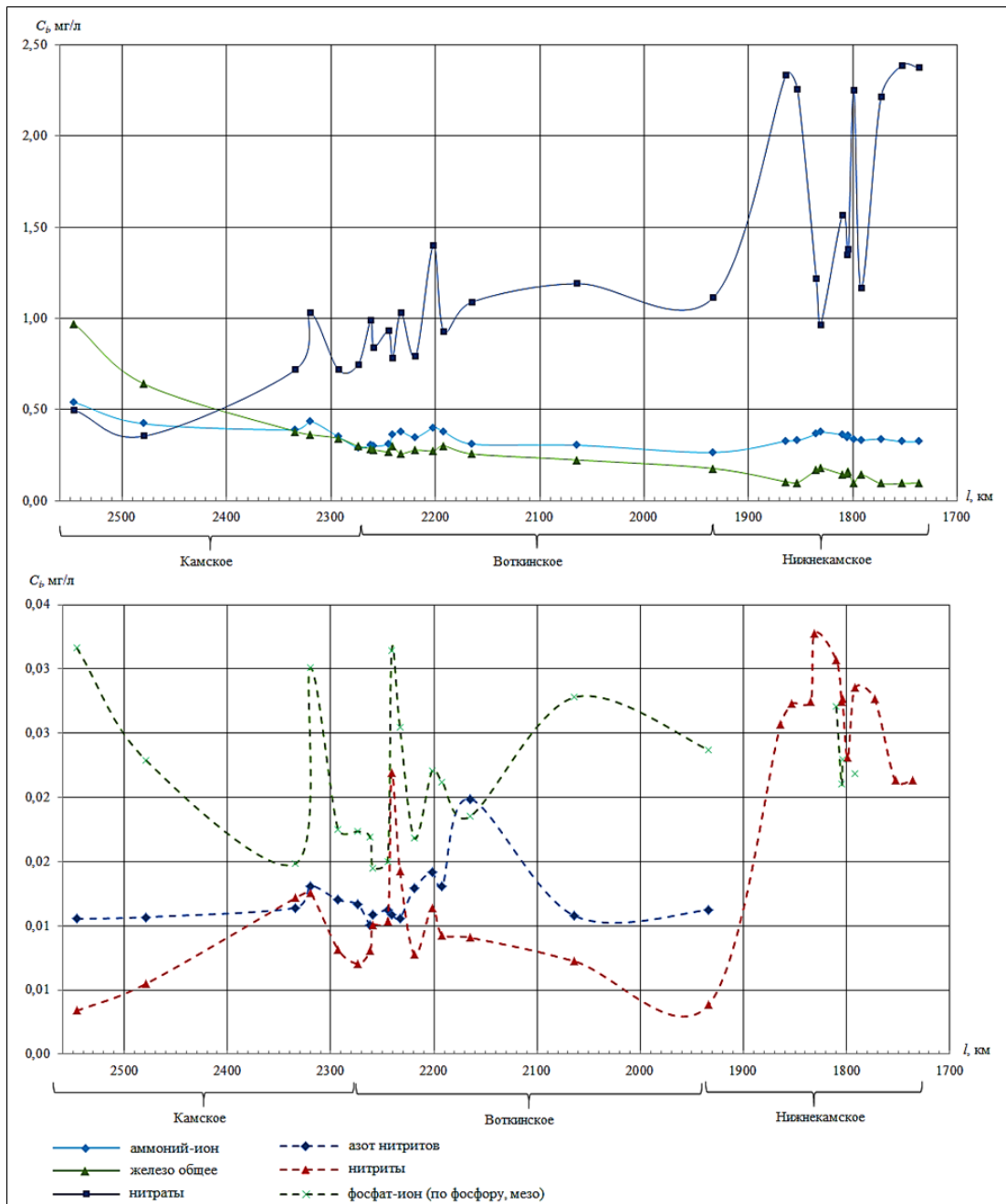


Рис. 11. Среднее за период 2005-2022 гг. изменение концентраций биогенных веществ (мг/л) по длине судового хода (км) камских водохранилищ

В целом на изменение концентраций биогенных веществ на Камских водохранилищах оказывают влияние: природный фон, стоки промышленных вод на верхних участках Камского водохранилища (Соликамско-Березниковский промузел), сбросы предприятий в районе г. Перми и сток с сельскохозяйственных территорий водосбора Нижнекамского водохранилища (Микова и др., 2025).

4.2. Изменение масс загрязняющих веществ

Методика расчёта масс.

Массы загрязняющих веществ в водохранилищах рассчитывались как произведение средневзвешенной концентрации вещества (по всем точкам отбора) на объём воды в водохранилище на соответствующую дату:

$$M_{i,j} = C_{i,j} * W_j \quad (2)$$

где $M_{i,j}$ – масса вещества i в водохранилище в момент времени j (т); $C_{i,j}$ – средняя концентрация вещества i на дату съёмки j (мг/л); W_j – объём воды в водохранилище на дату j (млн м³). Объёмы воды определялись по интерполяционным таблицам Правил использования водных ресурсов водохранилищ.

Следует отметить, что при расчёте средних значений не учитывались пространственные внутриводоёмные различия водных масс. Анализ проводился по 17 гидрохимическим показателям.

Среднегодовое содержание веществ.

В системе водохранилищ Камского каскада присутствует большое количество разнообразных загрязняющих веществ (ЗВ). Эти вещества находятся в различных состояниях в воде, общий объём которой для всего каскада составляет более 20 млрд. тонн. В воде Камских водохранилищ наибольший объём ЗВ приходится на сульфаты и хлориды, порядка 800 тыс. тонн, а также на ХПК – 500 тыс. тонн, этот показатель характеризует количество потребляемого кислорода, уходящего на окисление органических веществ в воде. Взвешенных веществ и растворенного кислорода в воде Каскада содержится по 170–210 тыс. тонн. Для окисления легкоокисляемых органических веществ (по БПК₅) потребовалось бы около 25–37 тыс. тонн кислорода. В водохранилищах Камского каскада присутствуют от 19 до 23 тыс. тонн нитратов, 3–7 тыс. тонн железа общего, примерно столько же приходится и на аммоний-ион – 1–9 тыс. тонн, около 1 тыс. тонн нефтепродуктов, чуть меньше показатель у нитритов – 620 тонн, 300–450 тонн фосфатов, 85–115 тонн цинка, около 100 тонн никеля, 50–56 тонн меди, примерно 40–60 тонн фенолов, около 5–8 тонн свинца (табл. 16).

Объемы воды в водохранилищах Камского каскада изменяются незначительно и определяются регулированием каскада. Максимальная разница между объемами водохранилищ в разные годы не превышает 20% (Камское водохранилище). При этом динамика среднегодовых запасов воды в водохранилищах не повторяет динамику притока воды к ним. В годы высокой водности количество воды в Камском и Воткинском водохранилищах выше, чем в годы низкой и средней водности. В Нижнекамском водохранилище объемы воды были наибольшими в год низкой водности. В среднем их колебания не превышают 2%, что связано с почти полным отсутствием сезонного регулирования и транзитной ролью водоема при сбросе воды с Камского в Волжский каскад (табл. 16).

В отличие от запасов воды в водохранилищах, разница между среднегодовыми запасами веществ в воде водохранилищ в годы разной водности достигает 60-70%. В отдельных случаях, однако требующих проверки и дополнительных исследований, зафиксированная разница достигала несколько тысяч процентов (для фенолов и взвешенных наносов).

В отношении ряда показателей наблюдается интересная тенденция: в многоводный 2019 г. в Каскаде были зафиксированы минимальные значения массы веществ. Так в 2019 г. содержание легкоокисляемых органических веществ по БПК₅ в Каскаде уменьшилось более чем на 20% по сравнению с маловодным по водности 2021 г.. Это связано с значительным сокращением (разбавлением) легкоокисляемых веществ в Камском и Воткинском водохранилищах в 2019 г.

Массы фосфатов, нитратов и свинца в 2019 г. уменьшились на 14–18% по сравнению со средним по водности 2014 г.. Сокращение данных веществ произошло за счет значительного их снижения в Камском и Воткинском водохранилищах. Чуть меньше сокращение масс пришлось на медь – 10% от среднего по водности 2014 г. и сульфаты – 5% от маловодного 2021 г. Сокращение меди связано с уменьшением его показателя в Нижнекамском водохранилище, а сульфатов – с значительным снижением в Воткинском водохранилище.

Таблица 16

Массы вещества в водохранилищах Камского каскада в тоннах в разные по водности притока годы: 2014 год – средний по водности, 2019 – многоводный; 2021 год – маловодный

Год	Водохранилища			Сумма ЗВ в водохранилищах каскада
	Камское	Воткинское	Нижнекамское	
Вода, 10 ⁹ тонн				
2021	8.10	7.72	4.20	20.0
2014	9.71	8.05	4.18	21.9
2019	9.73	8.37	4.12	22.2
Аммоний-ион, тонн				
2021	205	115	1348	1668
2014	4426	2956	1229	8612
2019	3079	2056	1380	6516
БПК ₅ , тонн				
2021	14512	10056	12718	37286
2014	9184	6755	8430	24369
2019	8424	7349	14371	30143
Взвешенные вещества, тонн				
2021	77647	79588	21710	178945
2014	73349	90917	34079	198345
2019	80773	82183	53395	216351
Железо общее, тонн				
2021	1866	1256	247	3369
2014	3116	2412	536	6064
2019	3965	3058	364	7388
Марганец двухвалентный, тонн				
2021	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
2014	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
2019	нет данных	нет данных	нет данных	нет данных
Медь, тонн				
2021	21.4	26.8	3.39	51.6
2014	30.8	20.8	4.44	56.0
2019	28.8	18.8	2.83	50.4
Нефтепродукты, тонн				
2021	382	377	115	874
2014	422	377	254	1053
2019	549	374	198	1121
Никель, тонн				
2021	41.1	39.1	21.0	101
2014	48.7	40.3	20.9	110
2019	50.5	43.0	21.0	115
Нитраты, тонн				
2021	5593	6644	10890	23127
2014	6012	9069	7128	22210
2019	5802	6754	7148	19705

Нитриты, тонн				
2021	-	-	93.1	-
2014	254	276	90.2	620
2019	-	-	88.1	-
Растворенный кислород, тонн				
2021	75783	64149	36433	176365
2014	86087	73051	35274	194413
2019	89136	75790	36692	201618
Свинец, тонн				
2021	2.51	2.32	0.91	5.74
2014	3.77	3.51	0.90	8.18
2019	2.96	2.79	1.04	6.79
Сульфаты, тонн				
2021	173097	350229	303236	826562
2014	185671	292064	237720	715455
2019	166132	292934	334424	793491
Фенолы, тонн				
2021	20.0	16.7	10.13	46.8
2014	20.8	17.3	5.45	43.5
2019	27.4	21.8	8.55	57.8
Фосфаты, тонн*				
2021	100	104	87.7	292
2014	242	152	65.6	459
2019	164	152	81.3	397
Хлориды, тонн				
2021	327410	343256	178313	848979
2014	343438	289586	219585	852610
2019	296279	379780	205788	881848
ХПК, тонн				
2021	209525	214124	98182	521831
2014	274946	197045	102879	574870
2019	308826	278035	91732	678593
Цинк, тонн				
2021	42.7	39.9	2.64	85.2
2014	63.0	46.3	3.44	113
2019	55.7	55.2	3.05	114

* - пересчитаны по данным о фосфоре фосфатов

Стоит отметить довольно значительное снижение массы аммоний-иона – 25% от среднего по водности 2014 г. Это связано с снижением его в Камском и Воткинском водохранилищах. Но еще большее сокращение наблюдается в маловодный 2021 г. (80%). Такое снижение требует уточнения и анализа с большим диапазоном лет.

Связь запасов азота и фосфора и водности года для разных соединений неоднозначна. Увеличение содержания масс аммоний-иона и фосфата

зафиксировано в средний по водности 2014 г. Чуть меньше поступило в многоводный 2019 г. Особого внимания заслуживает очень низкое содержание аммоний-иона в маловодном 2021 г., которое составило 80% от массы 2014 г. Такое снижение обусловлено крайне низкими показателями на Камском и Воткинском водохранилищах, что связано с отсутствием смыва веществ с водосбора из-за дефицита атмосферных осадков в летне-осенний период.

В разные по водности годы фиксировалось максимальное содержание масс веществ. Наибольшее количество загрязняющих веществ (ЗВ) приходится на многоводный 2019 г. (9 из 18). Это взвешенные вещества, железо, нефть, никель, растворенный кислород, фенолы, хлориды, ХПК и цинк. Прежде всего это связано с увеличением выноса ЗВ с притоком воды к водохранилищам.

На средний по водности 2014 г. и маловодный 2021 г. приходится по 4 (аммоний-ион, медь, свинец и фосфаты) и 3 (БПК₅, нитраты и сульфаты) ЗВ соответственно.

По марганцу данные отсутствуют, по нитритам имеются только за средний по водности 2014 г.

На основании вышеизложенного, нельзя однозначно утверждать о наличии тесной корреляции между массами ЗВ и объемом воды, поступающей в водохранилища с водосборной площади.

Внутригодовые изменения масс химических веществ в воде водохранилищ охватывают значительно больший диапазон значений, чем межгодовые изменения. В качестве показателя изменчивости принято отношение разности максимального и минимального значения показателя в течение года к минимальному, максимальному и среднему значениям показателя в течение года соответственно (табл. 17). Менее всего в течение выбранных лет изменялись массы никеля (в среднем в 1.2 раза, до 2 раз в 2019 г. в Камском водохранилище) и растворенного кислорода (в среднем в 1.1 раза, до 3 раз в 2014 г. в Камском водохранилище). Примерно в 1.7 раза в течение года изменялись показатели ХПК и массы хлоридов (кроме Нижнекамского

водохранилища, где внутригодовые изменения этих двух показателей достигали 7-11 раз) и БПК₅ (кроме Воткинского водохранилища, где внутригодовые изменения этого показателя достигали 4 раз). В 2.2-2.7 раза изменялись массы взвешенных веществ, меди, нефтепродуктов, нитратов, свинца и сульфатов.

Таблица 17

Внутригодовая изменчивость показателей содержания веществ в водохранилищах Камского каскада

Показатель	Внутригодовая изменчивость содержания вещества		
	Минимальная	Максимальная	Средняя
Аммоний-ион	1,0	136	5,3
БПК ₅	0,8	4	1,6
Взвешенные вещества	0,9	12	2,7
Железо общее	1,0	98	3,9
Марганец двухвалентный	нет данных	нет данных	нет данных
Медь	0,9	18	2,5
Нефтепродукты	0,9	9	2,3
Никель	0,7	2	1,2
Нитраты	0,9	9	2,3
Нитриты	1,0	-	4,1
Растворенный кислород	0,7	3	1,1
Свинец	0,9	6	2,2
Сульфаты	0,9	13	2,2
Фенолы	0,9	13	3,0
Фосфаты	0,9	15	5,5
Хлориды	0,9	11	1,7
ХПК	0,9	7	1,8
Цинк	1,0	68	3,8

Среди металлов более всего в течение рассматривавшихся лет были изменчивы массы меди (более чем в 18 раз), что отмечалась в 2014 г. в воде Нижнекамского водохранилища.

Наибольшая изменчивость отмечалась для аммоний-иона, железа общего, нитритов, фенолов, фосфатов и цинка. Массы последнего испытывали максимальную изменчивость всех в среднем по водности 2014-м г. в Нижнекамском водохранилище, достигнув 68 раз. Среди всех показателей наибольшая изменчивость характерна для железа общего – 98 раз на Нижнекамском водохранилище в 2021 г.

Распределение запасов вещества между водохранилищами Камского каскада в годы разной водности.

Отмечалась межгодовая устойчивость в распределении объемов воды между водохранилищами. Во все рассмотренные годы 40-44% воды всего Камского каскада было сосредоточено в Камском водохранилище, 37-39% в Воткинском водохранилище и 18-21% в Нижнекамском (рис. 12). Точно такие же показатели были у никеля на всех водохранилищах. Очень близки – значения запасов растворенного кислорода, фенолов, свинца, ХПК и нитритов (рис. 12).

Так, в многоводный и средний по водности годы содержание растворенного кислорода в воде водохранилищ Камского каскада распределялась следующим образом: Камское – 44%, Воткинское – 38%, Нижнекамское – 18%. В маловодный год произошло небольшое сокращение содержания растворенного кислорода (на 1-2%) в Камском и Воткинском водохранилищах, и увеличение на 3% в Нижнекамском (рис. 12). Содержание (концентрация) растворенного кислорода в воде определяется температурой окружающей среды (чем выше температура воды, тем при прочих равных меньше растворимость кислорода воздуха в воде); жизнедеятельностью водной биоты (фотосинтезом, дыхание); наличием органических и неорганических веществ, поступающих с водосборов (аллохтонное загрязнение) или образующихся внутри водохранилищ (автохтонное загрязнение), и на окисление которых тратится кислород (Басова, 2021).

Выявленное распределение запасов кислорода между водохранилищами аналогично распределению запасов воды и, по-видимому, определяется двумя основными факторами:

1. Все водохранилища расположены в одной климатической зоне и имеют близкий термодинамический режим, определяющий растворимость кислорода воздуха в воде (зональный фактор).

2. Все водохранилища образованы в пределах одного гидрологического объекта с единой биосистемой, функционирующей достаточно однородно в пределах рассматриваемого каскада.

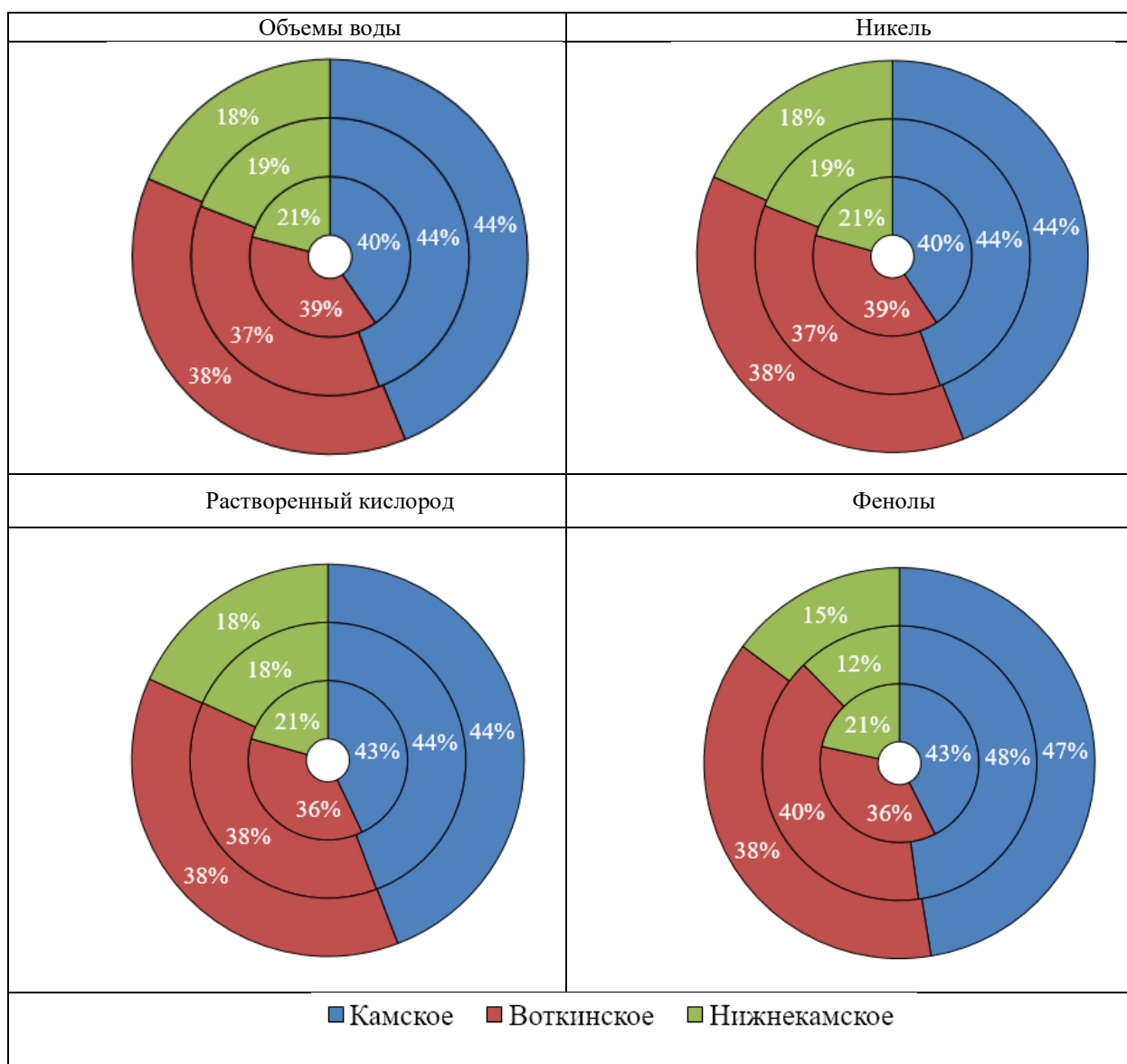


Рис. 12. Камский каскад. Распределение объемов воды и масс веществ по водохранилищам. Внешний круг – многоводный год (2019 г.), ближе к центру – средний по водности (2014 г.), в центре – маловодный год (2021 г.)

Эти два фактора обеспечивают стабильность распределения запасов кислорода в воде водохранилищ и компенсируют при выбранном пространственно-временном уровне усреднения (водохранилище в целом, год) других факторов, таких как поступление аллохтонного загрязнения, вторичного загрязнения от донных отложений и влияние подземных вод.

Однако отметим, что на локальном уровне и на коротких временных промежутках воздействие внешних факторов может значительно изменять местный гидрохимический режим (Лазерва, 2018).

Возможное отклонение в распределении масс вещества в каскаде водохранилищ от распределения масс воды может свидетельствовать о влиянии местных факторов (геологического строения, структуры ландшафтов, антропогенного воздействия). Чем выше отклонение – тем сильнее влияние на содержание веществ в водохранилище местных природных особенностей и антропогенных факторов.

Все рассматриваемые гидрохимические показатели были разделены на две группы в зависимости от водности года. В первой группе распределение веществ по водохранилищам каскада оставалось относительно стабильным вне зависимости от года (рис. 13). Отклонения от года к году встречаются у 5 ЗВ, это характерно для распределения нитратов, сульфатов, хлоридов, взвешенных веществ и БПК₅, но в целом отличия между годами разной водности невелики. В то же время для ряда веществ в данной группе были выявлены стабильные различия в их распределении между водохранилищами по сравнению с распределением масс воды вне зависимости от водности года. Это, вероятно, указывает на наличие некоторых постоянно действующих факторов, которые могут быть как природными, так и антропогенными на уровне водосбора водохранилища.

Довольно схожая между собой динамика распределения масс наблюдается у нитритов, сульфатов, хлоридов. Наибольшее количество приходится на Воткинское водохранилище и варьируются в диапазоне от 29% до 41% по нитритам, от 37% до 42% по сульфатам и 34% до 43% по хлоридам. Примерно такие же значения нитритов и сульфатов наблюдаются на Нижнекамском водохранилище. На Камском количество хлоридов больше, а нитратов и сульфатов гораздо меньше по сравнению с нижерасположенными водохранилищами. Основным источником загрязнения Воткинского водохранилища, в том числе сбросами нитратов и сульфатов, является

Пермско-Краснокамский промышленный комплекс в его верхней части. (Китаев, 2008). Высокие показатели на Нижнекамском водохранилище обусловлены ведением сельского хозяйства, поскольку сельскохозяйственные поля занимают порядка 70% от частной водосборной площади самого водохранилища.

Немного другая ситуация наблюдается у взвешенных веществ. Наибольшие значения их содержания на Камском и Воткинском водохранилищах (37-46%) связаны с активной переработкой берегов, а на Нижнекамском, которое работает при транзитном стоке, происходит их снижение практически в 2 раза (12-25%).

Распределение меди и железа общего обусловлено природными факторами, связанными с геологическими особенностями данной местности. Существенное сокращение показателей на Нижнекамском водохранилище является следствием аккумулярующей способности Воткинского водохранилища.

Ко второй группе ЗВ относятся аммоний-ионы и нефтепродукты, распределение которых между водохранилищами значительно отличается от распределения масс воды по каскаду, сильно варьируется от года к году и обусловлено антропогенным происхождением сбросов (рис. 14).

Комплексная оценка качества воды

Для интегральной оценки качества воды применен удельный комбинаторный индекс загрязнения воды (УКИЗВ), рассчитанные по методике РД 52.24.643-2002. Выполнен анализ данных государственного мониторинга Росводресурсов за 2002-2022 гг. по 15 элементам, который показал, что качество воды в водохранилищах Камского каскада остаётся «2-загрязненным» и «3а-слабо загрязненным» (табл. 18). Ни в одном из них вода не соответствует требованиям рыбохозяйственного водопользования, установленным СанПиН и ПДКр.х.

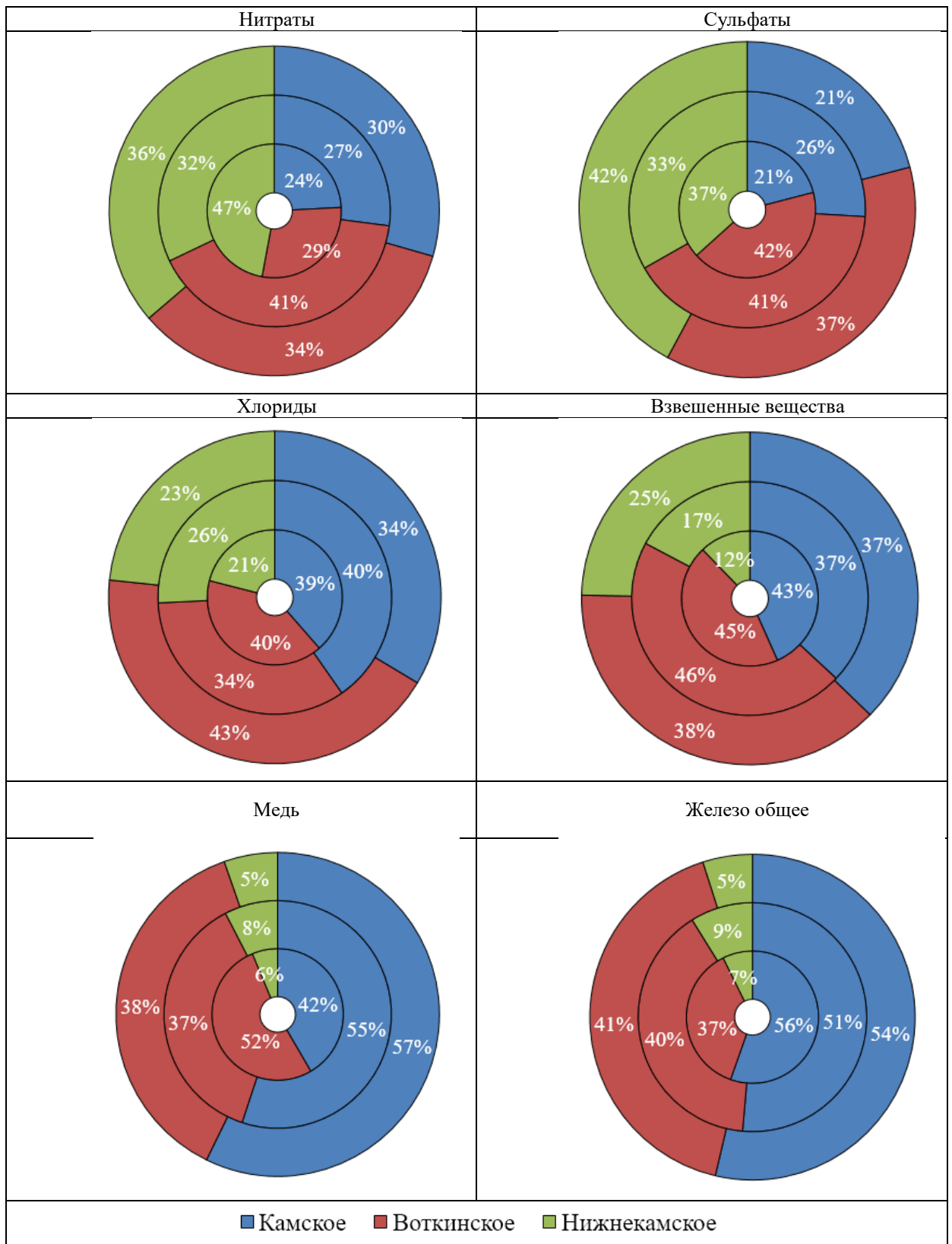


Рис. 13. Камский каскад. Распределение масс веществ по водохранилищам. Случай квазипостоянного распределения. Внешний круг – многоводный год (2019 г.), ближе к центру – средний по водности (2014 г.), в центре – маловодный год (2021 г.)

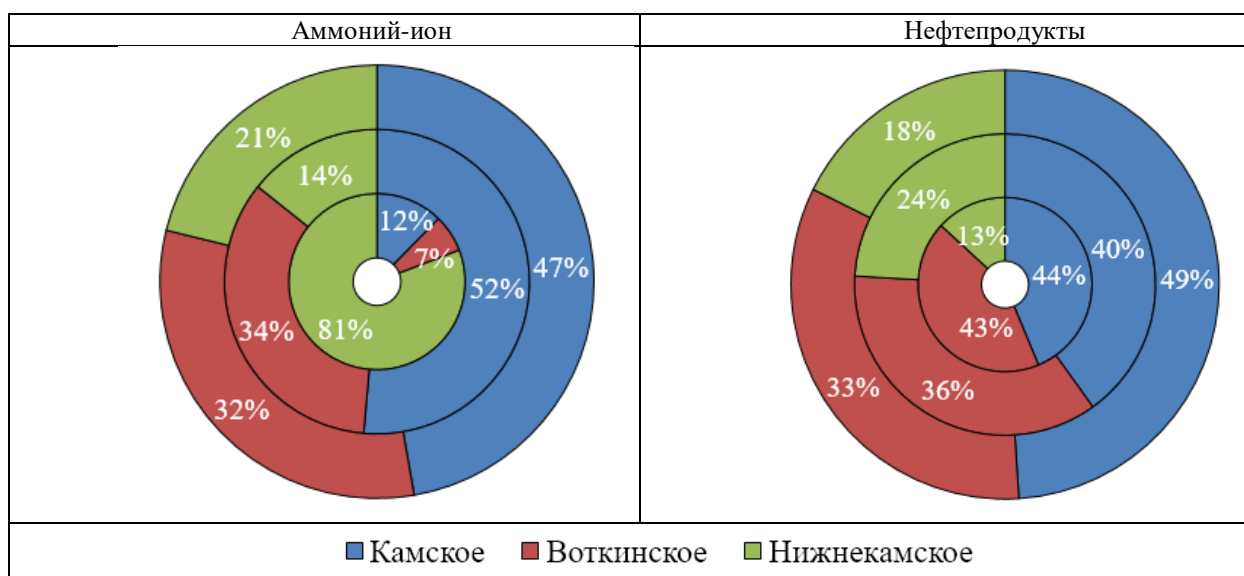


Рис. 14. Камский каскад. Распределение масс веществ по водохранилищам. Случай нарушения распределения. Внешний круг – многоводный год (2019 г.), ближе к центру – средний по водности (2014 г.), в центре – маловодный год (2021 г.)

Таблица 18

Интегральные показатели качества воды в Камском каскаде

Водохранилище	Год	ИЗВ	Класс по ИЗВ	15 основных ЗВ для расчета УКИЗВ	УКИЗВ	Класс по УКИЗВ
Камское	2014	2,12	III	Аммоний-ион, БПК5, железо общее, медь, нефтепродукты, никель, нитраты, нитриты, растворенный кислород, свинец, сульфаты, фенолы, хлориды, ХПК, цинк	2,71	3а
	2019	2,09	III		2,59	3а
	2021	1,82	III		2,72	3а
Воткинское	2014	1,79	III		2,64	3а
	2019	2,05	III		2,33	3а
	2021	1,78	III		2,86	3а
Нижнекамское	2014	1,13	III		2,21	3а
	2019	1,13	III		1,94	2
	2021	1,15	III		1,71	2

Анализ табл. 18 показал, что превышение предельно допустимых концентраций железа и меди является характерным для верхней части водосбора Камского водохранилища. Это обусловлено природными физико-географическими условиями, в частности наличием крупных заболоченных участков, с которых происходит вынос этих элементов. Для корректной оценки антропогенной составляющей загрязнения необходимо учитывать природный региональный фон. Верхняя часть водосбора Камского водохранилища (ниже устья р. Вишеры, в районе пгт. Тюлькино)

характеризуется минимальной техногенной нагрузкой и может рассматриваться как фоновый участок. Концентрации железа здесь достигают 0,97 мг/л, меди – 0,0026 мг/л, что уже ПДКр.х. Сопоставление с нижележащими створами, в частности на выходе из Камского водохранилища (Левшино), показывает, что концентрация железа снижается до 0,3 мг/л, тогда как меди незначительно возрастает до 0,0029 мг/л. Это свидетельствует о том, что наблюдаемое превышение ПДКр.х. по железу и меди имеет как природную составляющую, формирующуюся в верхней части водосбора, так и антропогенную, проявляющуюся в локальном повышении концентраций под влиянием точечных источников. В отличие от этих элементов, устойчиво высокие концентрации биогенов (аммоний-ион, фосфаты, органические вещества) в центральной и нижней частях каскада однозначно свидетельствуют о доминировании антропогенных источников, связанных с коммунальными и сельскохозяйственными стоками.

Несмотря на то, что биогенные вещества в большинстве проб не превышают ПДКр.х., они являются стабильными источниками поступления соединений азота и фосфора, и создают благоприятные условия для эвтрофикации. Аммоний-ион (NH_4^+) – один из ключевых показателей азотного загрязнения. Анализ данных показал, что среднемноголетние концентрации аммония находятся в диапазоне 70-90% от ПДКр.х. (0,5 мг/л), однако в отдельные месяцы фиксируются экстремально высокие значения, превышающие норматив:

- Камское водохранилище: до 0,97 мг/л (почти 2 ПДКр.х.);
- Воткинское: до 0,55 мг/л (1,1 ПДКр.х.);
- Нижнекамское: 0,29-0,34 мг/л (60-70% ПДКр.х., без превышений).

Главная опасность заключается не в разовых превышениях, а в устойчиво высоком фоне аммония (обнаруживается в 50-100% проб) в сочетании с повышенными значениями ХПК и БПК₅ (в Нижнекамском БПК₅ достигает 3,5 мг/л при ПДКр.х. 2,1 мг/л), что свидетельствует о постоянном

поступлении органических сельскохозяйственных, коммунальных и промышленных стоков.

Установлено, что биогенное загрязнение не имеет прямой зависимости от водности года. Механизмы, поддерживающие высокий уровень загрязнения, различаются. В многоводные годы (2019) рост стока сопровождается усиленным диффузным выносом биогенов с сельхозугодий, когда масса смываемых веществ возрастает, частично нивелируя эффект разбавления. В маловодные годы (2021) снижение диффузного стока компенсируется увеличением доли точечных сбросов (коммунальные и промышленные стоки), постоянное количество которых поступает в водохранилища каскада и приводит к сохранению высоких концентраций ЗВ, особенно по азоту.

Коэффициент комплексности загрязнения (доля показателей с превышением ПДКр.х.) составляет 20-30%, что подтверждает устойчивую антропогенную нагрузку на водные объекты. При этом Нижнекамское водохранилище демонстрирует лучшее качество воды, что связано с его транзитным режимом, меньшей продолжительностью водообмена и более низким вкладом локальных источников по сравнению с вышерасположенными водохранилищами.

Таким образом, качество воды в исследуемых водохранилищах 2002-2022 гг. не соответствует рыбохозяйственным нормативам. По УКИЗВ – Камское и Воткинское к категории «загрязнённые» (3а), Нижнекамское – преимущественно к «слабо загрязнённому» (2 класс), при этом вода характеризуется устойчивым превышением ПДКр.х. по общему железу, меди, ХПК и фенолам независимо от водности года.

5. Анализ гидролого-геохимических процессов на водосборах водохранилищ Камского каскада с применением модели ЛГМ-2

5.1. Методология и адаптация ландшафтно-гидрологической модели (ЛГМ-2) к условиям водосборов Камского каскада

Для решения поставленных в работе задач – оценки пространственно-временной изменчивости диффузного стока биогенных веществ (азота и фосфора) и его прогноза при различных сценариях – была выбрана ландшафтно-гидрологическая модель ЛГМ-2, разработанная в Институте географии Российской академии наук. Выбор данной модели обусловлен её способностью учитывать мозаичную структуру водосборов, дифференцировать антропогенную нагрузку по типам угодий и рассчитывать вынос загрязняющих веществ с различными видами стока (поверхностным, подповерхностным, подземным и с твёрдым стоком – эрозией). В отличие от зарубежных аналогов (*SWAT*, *HSPF*), требующих сложной калибровки гидрохимических блоков, ЛГМ-2 изначально ориентирована на оценку именно биогенной нагрузки и адаптирована к условиям равнинных водосборов Восточно-Европейской равнины.

Общая характеристика и принципы работы модели ЛГМ-2

ЛГМ-2 является развитием ландшафтно-гидрологического подхода и реализованного в первых версиях модели (Ясинский, Кашутина, 2020). Сущность подхода заключается в следующем: на участках водосбора, различающихся по характеристикам рельефа, почвенного и растительного покровов, а также по особенностям хозяйственной деятельности, формируются различные по объёму потоки воды и наносов с разной концентрацией взвешенных и растворённых веществ. Сумма потоков с этих участков, трансформированных овражно-балочной сетью, формирует итоговый сток загрязняющих веществ в гидрографическую сеть и далее – в водный объект (рис. 15).

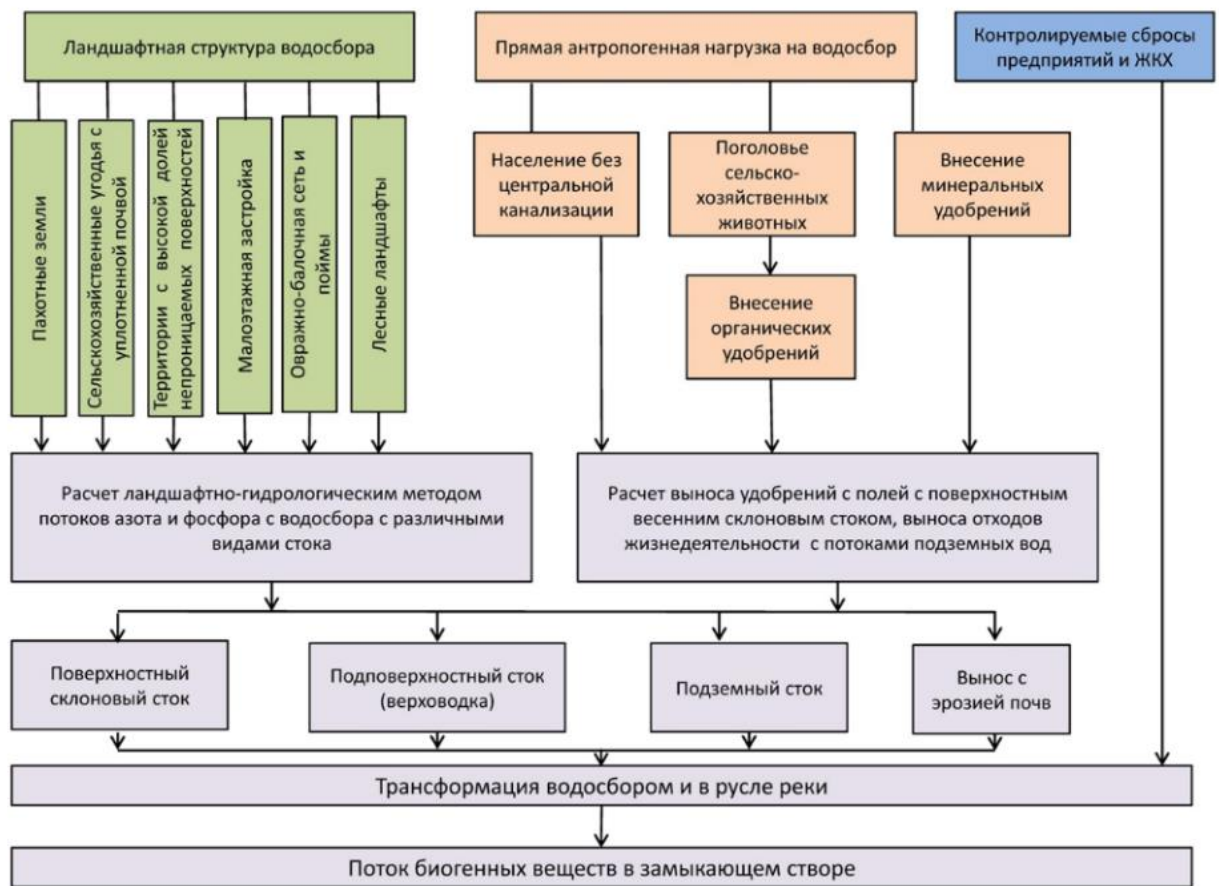


Рис. 15. Блок-схема расчёта стока биогенных веществ с водосбора с учётом ландшафтной структуры и антропогенной нагрузки (Ясинский, Кашутина, 2020).

Модель позволяет оценить поступление биогенных веществ (БВ) в водный объект с учётом пространственной неоднородности ландшафтной структуры и степени антропогенной трансформации водосбора. Диффузный сток биогенных элементов с водосбора описывается следующим уравнением:

$$S_{ij} = K_j C_{ij} Y_{ij} F_i \quad (3)$$

где S_{ij} – масса биогенного вещества (в тоннах) с j -м видом стока с i -го угодья; C_{ij} – концентрация биогенного вещества в стоке (мг/л); i – тип угодья (пахотные земли, луга и пастбища, лесные ландшафты, урбанизированные территории, овражно-балочная сеть и поймы); j – вид стока: 1 – поверхностный склоновый, 2 – подповерхностный (верховодка), 3 – подземный, 4 – сток наносов (продуктов эрозии); Y_{ij} – слой стока (для жидкого

стока – в мм) или модуль стока наносов (для эрозии – в кг/га) с i^* -го угодья; F_i – площадь i^* -го угодья на водосборе (км²); K_j – коэффициент для согласования размерностей (Ясинский, Кашутина, 2020).

Слои поверхностного склонового стока с полевых и лесных угодий оценивались в соответствии с аппроксимациями С.В. Ясинского (2007) эмпирических зависимостей Н.И. Коронкевича (1990):

$$Y_{i1} = f(Y_{rr}) \quad (4)$$

Y_{i1} – слой поверхностного склонового стока с i -го угодья; Y_{rr} – слой стока половодья, определяемый по гидрографам стока.

Слои поверхностного склонового стока с урбанизированных территорий и с овражно-балочной сети рассчитывались по соотношениям характерных коэффициентов стока с этих поверхностей и с полевых участков.

Слой подземного стока в половодье определялся расчленением гидрографов стока, предполагался одинаковым для всех угодьев. Рассчитывался подповерхностный сток (верховодка) и для всего водосбора, и для лесных угодьев.

Он оценивался по разнице речного стока за половодье, поверхностного склонового стока за половодье и подземного стока за половодье (Ясинский, Кашутина, 2020).

Поверхностный склоновый сток в половодье для всего водосбора рассчитывался как средневзвешенный поверхностный склоновый сток с разных угодий с учётом ландшафтной структуры водосбора.

- Если расчётный объём стока верховодки со всего водосбора превышал расчётный объём верховодки с леса, предполагалось, что оставшаяся часть равномерно (в слоях стока) стекает с селитебных территорий и полевых участков.

- Если расчётный объём стока верховодки со всего водосбора был меньше расчётного объёма верховодки с леса, объём стока верховодки с леса уменьшался до расчётного объёма стока верховодки со всего водосбора. В

этом случае предполагалось, что верховодка на других угодьях не образовывалась (Ясинский, Кашутина, 2020).

Слой подземного стока в период вне половодья оценивался по разнице объемов годового гидрографа речного стока и стока за половодье.

Модуль стока наносов Y_{i4} за период половодья рассчитывался по следующему соотношению (Бобровицкая, 1977):

$$Y_{i4} = f(Y_{i1}) \quad (5)$$

Учет прямой антропогенной нагрузки на водосбор в ЛГМ

Для урбанизированных территорий расчёт сформированной на них антропогенной нагрузки выполнялся исходя из численности проживающего там населения. По материалам (HELCOM, 2005), от одного жителя поступает 0.9 кг общего фосфора и 4.4 кг общего азота в год.

В расчётах диффузного загрязнения принято, что при отсутствии центральной канализации в сельских населённых пунктах отходы жизнедеятельности поступают в подземный сток в пределах населённых пунктов и выносятся равномерно в течение года. Предполагается, что всё городское население водосбора Чебоксарского водохранилища имеет доступ к центральной канализации и в расчётах диффузного стока не учитывается (Ясинский, Кашутина, 2020).

Отходы от животноводства и птицеводства частично поступают на пашню как органические удобрения и формируют потенциальные диффузные источники загрязнения водных объектов биогенными элементами (БВ). По данным (Брюханов, 2016; Кондратьев, 2018) определено содержание азота и фосфора в продуктах жизнедеятельности сельскохозяйственных животных (табл. 19).

При определении количеств азота и фосфора, внесённых с *минеральными удобрениями*, использовалось соотношение *НРК 22:11:11*, характерное для Восточно-Европейской равнины (Брюханов, 2016; Кондратьев, 2018).

**Содержание общего азота и фосфора в отходах жизнедеятельности
сельскохозяйственных животных, кг/год на 1 голову**

Животные	Общий фосфор (кг/год на 1 голову)	Общий азот (кг/год на 1 голову)
Крупный рогатый скот	42	82,1
Свиньи	13,2	31,2
Овцы и козы	2,4	8,5
Лошади	24,5	50,8
Кролики	1	0,7
Птицы	1,4	1,5

При расчётах среднего многолетнего стока БВ с пахотных земель принято, что величина потоков обусловлена как их фоновыми региональными значениями, так и выносом неусвоенных растениями и почвой удобрений. В расчётах предполагается, что вынос неусвоенной части удобрений осуществляется поверхностным склоновым стоком в период половодья.

К фоновым потокам азота и фосфора, стекающих со склоновым стоком с сельскохозяйственных полей, добавляется поступление азота и фосфора с минеральными и органическими удобрениями:

$$L_{arg} = a_1 M_{min} + a_2 M_{org} \quad (6)$$

L_{arg} – неусвоенная сельскохозяйственными культурами масса БВ;

M_{min} и M_{org} – массы внесённых на поля минеральных и органических удобрений;

a_1 – коэффициент, учитывающий усвоение минеральных удобрений сельскохозяйственными культурами (0.3 для азота и 0.03 для фосфора);

a_2 – коэффициент, учитывающий усвоение органических удобрений сельскохозяйственными культурами (0.1 для азота и 0.02 для фосфора) (Кондратьев, 2018).

По данным (Кондратьев, 2018, 2019), фоновые концентрации общего фосфора и общего азота в почвенных водах и первичных звеньях гидрографической сети для различных типов поверхности в южной части лесной зоны составляют:

- 0.05 мг Р/л и 0.7 мг N/л для естественных территорий (лесов и болот),
- что соответствует 0.02 мг/л минерального Р и 0.35 мг/л минерального N.

Для пересчёта общего азота в минеральный азот использовался коэффициент 2 (Кондратьев, 2019), для пересчёта общего фосфора в минеральный – коэффициент 2.5.

В методике ЛГМ-2 реализован учет уменьшения водосбором как твердого, так и растворенного стока БВ.

Для оценки притока БВ со стоком наносов M_H к замыкающему створу водосбора используется уравнение:

$$M_H = D_H \sum_{i=1}^6 S_{i4} F_i \quad (7)$$

где D_H – коэффициент доставки наносов. Величина D_H рассчитывается как функция площади водосбора (Голосов, 2003):

$$D_H = 0.65 F^{-0.27} \quad (8)$$

Формула (8) имеет недостаток – при достаточно больших величинах площади водосбора приращение площадей практически не оказывает влияние на задержание водосбором.

Для оценки притока БВ с жидким стоком к замыкающему створу водосбора $M_{жс}$ используется уравнение:

$$M_{жс} = D_{жс} \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^3 S_{ij} F_i \quad (9)$$

где $D_{жс}$ – коэффициент трансформации потока растворенных БВ на пути от первичных элементов гидрографической сети до устья реки (Кондратьев, 2018):

$$D_{жс} = \frac{1}{1 + a q^b} \quad (10)$$

q – модуль стока, л/с/км² (зависящий от объема стока воды и площади водосбора); a и b – безразмерные эмпирические параметры, составляющие

соответственно 26.6 и –1.71 для фосфора и 1.9 и –0.49 для азота (Кондратьев, 2018).

В расчетах параметры формулы (10) приняты одинаковыми для всех водосборов. Коэффициент трансформации $D_{жс}$ – это интегральный параметр, характеризующий удержание БВ водосбором во всех средах: на поверхности склонов, в почвах и в грунтах. Дифференциация учитываемых потоков (перенос растворенных веществ поверхностным, внутрипочвенным и подземным стоком) в дальнейшем потребует и дифференциации коэффициентов удержания, зависящих от характеристик среды переноса (Ясинский, Кашутина, 2020).

Адаптация модели к условиям водосборов Камского каскада

В ходе выполнения диссертационного исследования модель ЛГМ-2 была адаптирована к специфике водосборов Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ. Адаптация включала три основных направления: доработку методики пространственной привязки статистических данных, создание специализированного ГИС-обеспечения.

Первое и наиболее важное направление адаптации связано с учётом неравномерности распределения антропогенной нагрузки в пределах административных единиц. В исходной версии ЛГМ-2 показатели нагрузки (численность населения, поголовье скота, площади посевов, объёмы внесения удобрений) задавались равномерно по всему субъекту РФ. Это приводило к значительным искажениям для водосборов, занимающих лишь часть территории региона. В рамках данной работы была разработана и реализована методика пространственной привязки: все статистические показатели распределялись пропорционально площади той части субъекта РФ, которая непосредственно входит в границы водосбора конкретного водохранилища. Расчёт долей выполнялся с использованием геоинформационных систем (*QGIS*, *ArcGIS*) на основе данных о границах водосборов и административно-территориальном делении.

Вторым направлением адаптации стала разработка автоматизированного ГИС-обеспечения модели. Создана база пространственных данных, включающая следующие тематические слои для 3 основных водосбора водохранилищ:

- гидрографическая сеть (масштаб 1:100 000);
- границы водосборов, выделенные по цифровой модели рельефа *SRTM* (разрешение 30 м);
- ландшафтная структура, выделены по тематическим слоям *OpenStreetMap* и данным *Global Land Cover* (8 классов угодий: леса, пахотные земли, луга и пастбища, урбанизированные территории, болота, водные объекты, овражно-балочная сеть, открытый грунт);
- почвенный покров (почвенная карта РФ масштаба 1:2 500 000, Единый государственный реестр почвенных ресурсов);
- антропогенная нагрузка (местоположение промышленных предприятий, населённых пунктов, данные о поголовье скота и внесении удобрений по муниципальным районам).

Структура земель на водосборах трёх камских водохранилищ, полученная в результате ГИС-анализа, приведена в таблице 3. Наибольшая доля сельскохозяйственных угодий характерна для водосбора Нижнекамского водохранилища (57% площади), что предопределяет высокий вклад агрогенных источников в его диффузное загрязнение. Водосбор Камского водохранилища, напротив, в значительной степени залесён (79% территории), что обеспечивает преобладание природного фонового выноса.

Характеристика входных данных для моделирования.

Для проведения расчётов по модели ЛГМ-2 был сформирован комплекс исходных данных, охватывающий гидрологические, гидрохимические и антропогенные параметры.

Гидрологические данные. Для расчёта слоёв стока (Y_{ij}) использовались ежедневные данные о расходах воды на гидрологических постах,

расположенных на основных притоках камских водохранилищ, за период 2002-2021 гг. Данные предоставлены сайтом Центра Регистра и Кадастра (<http://gis.vodinfo.ru>). На основе этих данных, а также с использованием региональных зависимостей (Коронкевич, 1990; Ясинский, 2018), были рассчитаны средние слои поверхностного склонового, подповерхностного и подземного стока для различных типов ландшафтов в годы разной водности (средний по водности – 2014, многоводный – 2019, маловодный – 2021). Для урбанизированных территорий и овражно-балочной сети использовались поправочные коэффициенты, учитывающие долю водонепроницаемых поверхностей.

Гидрохимические данные. Концентрации биогенных веществ (C_{ij}) и других загрязняющих веществ были получены из официальных материалов государственного мониторинга Камского бассейнового водного управления (КамБВУ) за период 2005–2022 гг. для Камского и Воткинского водохранилищ и за 2003–2022 гг. для Нижнекамского водохранилища. Отбор проб проводился в 40 точках (прил. Б), расположенных от верховьев Камского водохранилища до средней части Нижнекамского водохранилища. Периодичность отбора – 8-12 раз в год. Анализ выполнен по 20 химическим элементам на Камском и Воткинском водохранилищах и по 18 – на Нижнекамском (на последнем отсутствуют данные по азоту нитритов и азоту минеральному). Предельно допустимые концентрации (ПДК) для оценки качества воды приняты по нормативам для рыбохозяйственных водных объектов (Приказ Минсельхоза России № 552 от 13.12.2016).

Данные об антропогенной нагрузке. Для учёта точечных источников загрязнения использованы данные АИС ГМВО (форма 2-ТП «Водхоз») за 2010-2021 гг. по 18 показателям (азот аммонийный, азот общий, аммоний-ион, БПК полн., взвешенные вещества, железо, медь, нефтепродукты, никель, нитраты, нитриты, свинец, сульфаты, фенолы, фосфаты, хлориды, ХПК, цинк). Данные о прямой антропогенной нагрузке (поголовье скота, внесение минеральных удобрений, численность сельского населения) получены с

портала Единой межведомственной информационно-статистической системы (ЕМИСС) и из материалов Всероссийской сельскохозяйственной переписи 2016 г. за период 2008-2022 гг. Сведения о ландшафтной структуре получены по тематическим слоям *OpenStreetMap* и данным *Global Land Cover* с выделением 8 классов угодий.

Апробация модели на пилотных водосборах. Предварительная калибровка и апробация ЛГМ-2 выполнялись на водосборах рек Кудьмы и Линды – правого и левого притоков Чебоксарского водохранилища (соответственно). Выбор этих водосборов обусловлен их репрезентативностью: они отражают основные типы ландшафтной структуры, характерные для Волжско-Камского бассейна (лесные массивы левобережья и сельскохозяйственные угодья правобережья). Площадь водосбора р. Кудьмы составляет 3 246 км², р. Линды – 1 681 км².

Для этих водосборов были выполнены расчёты выноса биогенных веществ по модели ЛГМ-2 с использованием данных о ландшафтной структуре (полученных путём дешифрирования космических снимков Sentinel-2), гидрологических параметров (слоев стока за период половодья и межени) и антропогенной нагрузки (поголовье скота, внесение удобрений, численность сельского населения). Результаты моделирования сопоставлялись с данными натурных наблюдений, полученными в ходе полевых работ 2019-2020 гг., включавших отбор 103 проб поверхностных и подземных вод в разных звеньях гидрографической сети.

Сравнение расчётных и наблюдаемых концентраций биогенных веществ показало хорошее соответствие. Для минерального азота расхождения не превышали 12%, для минерального фосфора – 8% (Ясинский и др., 2020). Относительная ошибка моделирования среднесуточных значений выноса биогенных элементов, оценённая по сопоставлению рассчитанных и измеренных потоков в замыкающем створе р. Кудьмы, составила около 5% для минерального азота (расчётное значение 525,5 т/год против измеренного 551 т/год). Данная величина ошибки относится к интегральной годовой оценке и

достигнута благодаря многолетней калибровке модели на пилотных водосборах. В отдельные годы и для отдельных составляющих стока расхождения могут быть выше, что соответствует современному уровню точности подобных моделей. Полученные результаты подтверждают адекватность модели для условий равнинных водосборов с мозаичной структурой землепользования.

Следует отметить ограничения применяемой модели. ЛГМ-2 не учитывает внутриводоёмные процессы трансформации биогенов, такие как денитрификация в донных отложениях или потребление фитопланктоном в период летнего «цветения». Однако для целей оценки многолетнего диффузного стока с водосбора – это ограничение не является критическим, поскольку основная масса биогенов (до 70–80% годового выноса) поступает в водохранилища в короткий период весеннего половодья и быстро транзитом проходит через водохранилища, особенно в условиях недельного и суточного регулирования стока ГЭС. Кроме того, фокус данного исследования направлен на сравнение относительного вклада различных источников и сценариев, а не на абсолютные значения, что снижает чувствительность к неучтённым внутриводоёмным процессам.

Таким образом, адаптированная и верифицированная модель ЛГМ-2 является адекватным инструментом для оценки пространственно-временной изменчивости диффузного загрязнения водосборов Камского каскада и для разработки прогнозных сценариев. Результаты моделирования представлены в следующих разделах.

5.2. Оценка современного диффузного загрязнения водохранилищ Камского каскада

На основе адаптированной и верифицированной модели ЛГМ-2 были выполнены расчёты диффузного стока биогенных веществ (азота и фосфора) с водосборов Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ.

Расчёты проведены для трёх характерных по водности лет: среднего по водности (2014 г.), многоводного (2019 г.) и маловодного (2021 г.). Выбор этих лет обусловлен их репрезентативностью для современного периода (2002–2022 гг.) и наличием полных гидрологических и гидрохимических данных.

Анализ включал три основных блока: (1) оценку выноса биогенных элементов по типам ландшафтов; (2) сравнение вклада диффузных источников, точечных сбросов и прямой антропогенной нагрузки; (3) анализ пространственно-временной изменчивости диффузного стока в зависимости от водности года.

Вынос биогенных элементов по типам ландшафтов.

Результаты расчётов выноса азота и фосфора, детализированные по типам ландшафтов, представлены в табл. 20. Анализ таблицы позволяет сделать следующие выводы.

Доминирование сельскохозяйственных ландшафтов. Наибольший вклад в диффузную нагрузку вносит ландшафт «сельскохозяйственные угодья с уплотнённой почвой» (нераспаханные с осени поля, пастбища, сенокосы). На его долю в разные годы приходится от 58 до 72% суммарного выноса азота и от 57 до 72% фосфора. Это подтверждает, что именно агрогенные источники являются главным фактором диффузного загрязнения водохранилищ Камского каскада. Особенно ярко это проявляется для Нижнекамского водохранилища, где на долю уплотнённых почв и пахотных земель суммарно приходится до 85% выноса азота и до 80% выноса фосфора. Такое распределение закономерно, поскольку на водосборе Нижнекамского водохранилища сосредоточено 79% всех сельскохозяйственных угодий каскада (табл. 20).

Доминирование сельскохозяйственных ландшафтов. Наибольший вклад в диффузную нагрузку вносит ландшафт «сельскохозяйственные угодья с уплотнённой почвой» (нераспаханные с осени поля, пастбища, сенокосы). На его долю в разные годы приходится от 58 до 72% суммарного выноса азота и от 57 до 72% фосфора. Это подтверждает, что именно агрогенные источники

являются главным фактором диффузного загрязнения водохранилищ Камского каскада. Особенно ярко это проявляется для Нижнекамского водохранилища, где на долю уплотнённых почв и пахотных земель суммарно приходится до 85% выноса азота и до 80% выноса фосфора. Такое распределение закономерно, поскольку на водосборе Нижнекамского водохранилища сосредоточено 79% всех сельскохозяйственных угодий каскада (табл. 20).

Таблица 20

Вынос азота и фосфора по типам ландшафтов на водосборах водохранилищ Камского каскада, т/год

Ландшафтная структура водосбора	Водохранилище	Азот			Фосфор		
		2014	2019	2021	2014	2019	2021
Пахотные земли	Камское	588	504	302	41,0	39,8	29,0
	Воткинское	47,0	34,0	23,0	2,66	2,47	1,55
	Нижнекамское	1943	2037	1004	85,9	82,8	59,5
Сельскохозяйственные угодья с уплотненной почвой	Камское	3336	3307	1922	212	234	135
	Воткинское	452	433	263	21,6	24,9	11,2
	Нижнекамское	12602	12110	6382	534	489	293
Лесные ландшафты	Камское	8 776	7 947	4511	705	678	306
	Воткинское	208	141	22,0	12,8	10,1	1,09
	Нижнекамское	1 142	120	84,0	64,8	7,24	4,23
Овражно-балочная сеть (ОБС) и поймы	Камское	3 281	2 931	1736	185	177	84,5
	Воткинское	171	147	84,0	7,51	7,47	2,81
	Нижнекамское	1 932	1 197	1030	76,8	47,8	34,2
Малозэтажная застройка	Камское	96,0	86,0	51,0	30,6	29,3	14,0
	Воткинское	13,0	11,0	6,00	3,36	3,34	1,26
	Нижнекамское	159	99,0	84,0	35,6	22,2	15,9
Территории с высокой долей непроницаемых поверхностей	Камское	536	479	283	60,8	58,0	27,7
	Воткинское	104	89,0	51,0	9,21	9,17	3,46
	Нижнекамское	151	93,0	80,0	12,1	7,52	5,39
Итого по ландшафтным структурам водосбора	Камское	16613	15254	8805	1 235	1215	596
	Воткинское	995	855	449	57,0	57,0	21,0
	Нижнекамское	17929	15656	8664	809	657	412

Роль лесных ландшафтов. Лесные ландшафты вносят существенный вклад в вынос биогенов только на водосборе Камского водохранилища, где леса занимают 79% территории. На водосборах Воткинского и, особенно, Нижнекамского водохранилищ доля лесов в суммарном выносе невелика (менее 10%). Характерно, что в маловодный 2021 г. вынос с лесных ландшафтов сократился наиболее резко – например, на водосборе Нижнекамского водохранилища в 13,6 раз по азоту и в 15,3 раза по фосфору

по сравнению со средним по водности 2014 г. Это связано с практически полным прекращением поверхностного склонового смыва в лесных массивах в условиях дефицита влаги.

Вклад урбанизированных территорий. Вынос с территорий малоэтажной и многоэтажной застройки (урбанизированные ландшафты) составляет относительно небольшую долю от суммарной диффузной нагрузки (3–8%). Однако, как будет показано в следующем разделе, вклад точечных сбросов с городских очистных сооружений в Воткинском водохранилище в маловодные годы становится определяющим.

Сравнение диффузного стока, точечных сбросов и прямой антропогенной нагрузки.

Для оценки относительной роли различных источников биогенной нагрузки был выполнен анализ трёх составляющих: (1) ландшафтный (диффузный) сток (рассчитанный по ЛГМ-2), (2) контролируемые сбросы предприятий и ЖКХ (данные АИС ГМВО), (3) прямая антропогенная нагрузка на водосбор (поступление от животноводства и неканализованного сельского населения, рассчитанное по ЛГМ-2). Результаты представлены в табл. 21.

Анализ табл. 21 позволяет выделить три типа водохранилищ по характеру биогенной нагрузки. Камское водохранилище – преимущественно диффузный ландшафтный тип. На его долю приходится 73–78% выноса азота и 70–82% выноса фосфора за счёт ландшафтного стока. Точечные сбросы вносят заметный вклад (23–36% по азоту и 6–20% по фосфору). Даже в маловодный 2021 г., когда абсолютные значения диффузного стока снизились, его доля осталась высокой (58% по азоту и 78% по фосфору). Рост доли фосфора в 2021 г. (с 70% в 2019 г. до 78%) обусловлен не увеличением его выноса (он закономерно снизился с 1215 до 596 т из-за маловодья), а более значительным (восьмикратным) сокращением объёмов контролируемых сбросов. Это подчёркивает нестабильность вклада точечных источников и доминирующую роль диффузного стока.

**Вклад составляющих выноса в общий баланс биогенных элементов в
водохранилищах Камского каскада, т/год (%)**

Составляющие выноса БВ	Водохранилище	Азот			Фосфор		
		2014	2019	2021	2014	2019	2021
Ландшафтная структура водосбора	Камское	16613 (73%)*	15254 (66%)	8 805 (58%)	1 235 (82%)	1 215 (70%)	596 (78%)
	Воткинское	995 (16%)	855 (16%)	449 (9%)	57 (25%)	57 (20%)	21 (15%)
	Нижекамское	17929 (53%)	15656 (47%)	8 664 (38%)	809 (44%)	657 (36%)	412 (34%)
Контролируемые сбросы предприятий и ЖКХ	Камское	5 171 (23%)	6 840 (30%)	5 455 (36%)	103 (7%)	344 (20%)	43 (6%)
	Воткинское	4 025 (67%)	3 001 (55%)	3 814 (75%)	87 (39%)	87 (30%)	74 (52%)
	Нижекамское	3 078 (9%)	3 193 (10%)	3 019 (13%)	47 (3%)	53 (3%)	60 (5%)
Прямая антропогенная нагрузка на водосбор	Камское	920 (4%)	922 (4%)	818 (5%)	164 (11%)	176 (10%)	126 (16%)
	Воткинское	1 028 (17%)	1 601 (29%)	803 (16%)	80 (36%)	143 (50%)	49 (34%)
	Нижекамское	12 538 (37%)	14603 (44%)	11363 (49%)	969 (53%)	1 114 (61%)	739 (61%)
Суммарный вынос БВ с водосбора	Камское	22 704	23016	15078	1 501	1 735	765
	Воткинское	6 048	5 457	5 066	224,3	286,6	144,1
	Нижекамское	33 546	33452	23046	1 825	1 824	1 211

Воткинское водохранилище – смешанный тип с высокой динамичностью источников. Это наиболее интересный и нетривиальный случай. По азоту доля диффузного стока варьирует от 9% в маловодный 2021 г. до 16% в многоводные годы, уступая точечным источникам (55–75%). По фосфору картина более контрастна: в многоводный 2019 г. диффузный сток и прямая антропогенная нагрузка суммарно преобладали (70%), тогда как в маловодный 2021 г. их вклад сократился до 49%. При этом суммарные объёмы точечных сбросов фосфора оставались относительно стабильными (74–87 т). Это означает, что водосбор Воткинского водохранилища, несмотря на локальную концентрацию промышленности (г. Пермь, г. Краснокамск), обладает значительным потенциалом диффузного смыва, реализующимся в многоводные годы. В маловодные годы роль этого источника

минимизируется, и на первый план выходят стабильные промышленно-коммунальные сбросы.

Нижекамское водохранилище – ярко выраженный диффузный аграрный тип. Здесь диффузный сток (животноводство, удобрения) безраздельно доминируют во все рассматриваемые годы. Суммарно на их долю приходится 90–95% азота и 95–97% фосфора. Вклад точечных сбросов предприятий и ЖКХ минимален (9–13% по азоту и 3–5% по фосфору). Это подтверждает, что биогенная нагрузка на Нижекамское водохранилище формируется практически полностью за счёт выноса с обширных сельскохозяйственных земель (площадь пашни в частном водосборе – 15000 км², 57% территории). Даже в маловодный 2021 г., когда абсолютные значения диффузного стока ожидаемо снизились, их доля в общем балансе остаётся высокой.

Пространственно-временная изменчивость диффузного стока в годы разной водности.

Сравнительный анализ суммарного выноса биогенных элементов в годы разной водности (табл. 22) выявил чёткую зависимость объёмов диффузного стока от гидрологических условий.

Реакция на маловодье. В маловодный 2021 г. суммарный вынос азота с водосборов Камского, Воткинского и Нижекамского водохранилищ сократился на 16–34%, а фосфора – на 34–49% по сравнению со средним по водности 2014 г. Наибольшее абсолютное снижение зафиксировано в бассейне Нижекамского водохранилища (–10 500 т азота и –614 т фосфора), что закономерно для наиболее освоенного водосбора. Особенно резкое снижение выноса фосфора (на 49% в Камском водохранилище) объясняется тем, что фосфор в основном переносится в твёрдой фазе (с эрозией почв), которая чувствительна к снижению поверхностного стока.

**Сравнительный анализ диффузного стока в годы разной водности
(в % от показателя 2014 г.)**

Загрязняющее вещество	Водохранилище	Масса ЗВ в тоннах за год			Отклонение 2019 от 2014 (%)	Отклонение 2021 от 2014 (%)
		2014	2019	2021		
Азот	Камское	22 704	23 016	15 078	1	-34
	Воткинское	6 048	5 457	5 066	-10	-16
	Нижнекамское	33 546	33 452	23 046	0	-31
Фосфор	Камское	1501	1735	765	16	-49
	Воткинское	224	287	144	28	-36
	Нижнекамское	1825	1824	1211	0	-34

Поведение в многоводный год. В многоводный 2019 г. вынос азота в Камском и Нижнекамском водохранилищах оставался на уровне среднемноголетних значений (изменение в пределах 1%), тогда как в Воткинском, напротив, снизился на 10% за счёт уменьшения контролируемых сбросов. По фосфору в 2019 г. наблюдался существенный рост в Камском (+16%) и Воткинском (+28%) водохранилищах при стабильных показателях Нижнекамского. Отсутствие значимого роста выноса в 2019 г. на основных сельскохозяйственных водосборах объясняется тем, что, несмотря на высокую водность года в целом (за счёт летне-осенних паводков), в период весеннего половодья значения стока были близки к норме и даже уступали показателям половодья 2014 г. (снегозапасы 2014 г. были на 20% выше). Поскольку основной вынос биогенов происходит именно в период снеготаяния, аномально высокие летне-осенние дожди не привели к пропорциональному росту годового диффузного стока.

Экологические последствия диффузного загрязнения.

Выявленные закономерности диффузного загрязнения имеют прямые экологические последствия для водохранилищ Камского каскада. Постоянное поступление биогенных веществ (особенно фосфора, лимитирующего первичную продукцию) создаёт предпосылки для эвтрофикации водных объектов. Как показано в Главе 4, качество воды во всех трёх водохранилищах стабильно не соответствует рыбохозяйственным нормативам (III класс по

ИЗВ, категории «загрязнённая» и «очень загрязнённая» по УКИЗВ). Концентрации общего железа, меди и фенолов регулярно превышают ПДК в 2–4 раза, а в отдельных створах – на порядок.

Наиболее уязвимым с точки зрения эвтрофикации является Нижнекамское водохранилище, которое, с одной стороны, принимает максимальную биогенную нагрузку (более 60% общекаскадного выноса азота и фосфора), а с другой – имеет относительно небольшой полезный объём (0,77 км³) и работает в транзитном режиме, что не способствует осаждению биогенов. В периоды летней межени при высоких температурах воды создаются благоприятные условия для «цветения» цианобактерий, что подтверждается повышенными значениями ХПК и БПК₅ (до 1,4 ПДК) в летне-осенний сезон.

Воткинское водохранилище испытывает максимальную техногенную нагрузку от промышленных центров (г. Пермь, г. Краснокамск). В маловодные годы, когда доля точечных сбросов возрастает до 75% по азоту и 52% по фосфору, резко возрастают риски локальных загрязнений тяжёлыми металлами и нефтепродуктами. В многоводные годы, напротив, доминирует диффузный смыв с сельскохозяйственных полей, что приводит к более равномерному, но хроническому загрязнению.

Для снижения негативных последствий необходима реализация комплекса природоохранных мероприятий, дифференцированных по типам ландшафтов и источникам нагрузки.

5.3. Прогноз диффузного загрязнения водохранилищ Камского каскада с учетом комплексных изменений на их водосборах

Для оценки возможных изменений диффузного стока биогенных веществ в XXI веке были разработаны прогнозные сценарии, интегрирующие климатические проекции и социально-экономические тренды. Прогнозирование осуществлялось на период до 2050 г. с использованием

адаптированной модели ЛГМ-2, в которой в качестве ключевого динамического параметра применялся слой стока, скорректированный в соответствии с климатическими сценариями. Важно подчеркнуть, что если концентрации биогенов в воде (мг/л) могут оставаться сопоставимыми в разные по водности годы за счёт смены механизмов поступления, то масса выноса (т/год) напрямую зависит от слоя стока и климатических факторов, что и отражают прогнозные расчёты.

Сценарии изменений климата, землепользования и антропогенной нагрузки.

Климатические сценарии. Для оценки будущих изменений гидрологического режима использованы климатические проекции, полученные в рамках международного проекта *CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project, 6-я фаза)* (Eyring et al., 2016; GMD). Выбор базового периода 1971–2000 гг. обусловлен его статусом стандартного климатологического периода, рекомендованного Всемирной метеорологической организацией (ВМО).

Из ансамбля моделей *CMIP6* были отобраны 9 моделей, наилучшим образом воспроизводящих современные годовые суммы осадков в регионе по величине, среднеквадратическому отклонению и площади совпадения трендов за период 1985–2014 гг. (Sidorova et al., 2023). Для прогнозных расчётов использованы три сценария Shared Socioeconomic Pathways (*SSP*) (IPCC AR6, 2021; Riahi et al., 2017):

- **SSP1-2.6 («зелёный»/устойчивый):** предполагает устойчивое развитие с низкими выбросами парниковых газов. К 2050 г. ожидается повышение температуры воздуха на 1,0–1,5°C, рост годового стока на 3–5%. Этот сценарий рассматривается как «нижняя граница» возможных изменений.
- **SSP2-4.5 («средний»/умеренный):** соответствует базовому сценарию, предполагающему сохранение современных тенденций развития. К 2050 г. ожидается повышение температуры воздуха на 1,5–2,0°C, рост

годового стока на 3–5%. Этот сценарий принят в качестве наиболее вероятного.

- **SSP5-8.5 («максимальный»/ископаемый):** характеризуется высокими выбросами парниковых газов и глубокой трансформацией хозяйственной деятельности. К 2050 г. ожидается повышение температуры воздуха на 2,0–2,7°C, рост годового стока на 5–7%. Этот сценарий рассматривается как «верхняя граница» возможных изменений.

Сценарии землепользования и антропогенной нагрузки. Изменения в хозяйственной деятельности для регионов бассейна Камы (Пермский край, Республика Татарстан, Удмуртская Республика, Республика Башкортостан) на основе данных Росстата и ЕМИСС были адаптированы следующие прогнозные параметры:

- **Сокращение сельскохозяйственной деятельности.** По данным Росстата и ЕМИСС, с 1990 по 2022 гг. поголовье крупного рогатого скота в регионах бассейна Камы сократилось на 40–60%, а площади пашни – на 15–25%. Этот тренд, по прогнозам, продолжится. При реализации сценария SSP2-4.5 ожидается сокращение поголовья скота на 10–15% к 2050 г., а при сценарии SSP5-8.5 – на 30–40% (из-за деградации пастбищ в условиях аридизации климата и оттока сельского населения).

- **Сокращение численности сельского населения.** По данным Росстата, численность сельского населения в регионах бассейна Камы сокращается в среднем на 0,5–1,0% в год. К 2050 г. ожидается снижение на 15–25% (SSP2-4.5) и на 25–30% (SSP5-8.5).

- **Стабилизация и сокращение площадей пашни.** Площади пахотных земель, по прогнозам, либо сохраняются на современном уровне (SSP2-4.5), либо сократятся на 20–30% (SSP5-8.5) за счёт деградации почв и перевода малопродуктивных угодий в залежь.

- **Рост урбанизации (умеренный).** Доля городского населения продолжит расти, однако площади урбанизированных территорий в границах водосборов увеличиваются незначительно (в среднем на 0,5–1% в год), что

связано с уплотнением застройки, а не с расширением городов. В прогнозных сценариях рост площадей с высокой долей непроницаемых поверхностей принят на уровне 5–10% от современного значения.

Обоснование выбора сценариев для бассейна Камы.

Выбор сценариев *SSP2-4.5* и *SSP5-8.5* обусловлен следующими причинами:

1. Репрезентативность для региона. Для бассейна Камы имеются опубликованные оценки будущих изменений стока, выполненные по ансамблю моделей CMIP6 (Sidorova et al., 2023). Показано, что норма стока в XXI веке изменится незначительно (до $\pm 10\%$), но коэффициент вариации возрастёт, что приведёт к увеличению числа экстремально засушливых и многоводных лет.

2. Доступность данных. Для выбранных сценариев имеются полные прогнозные ряды температуры воздуха и осадков с суточным разрешением по всем метеостанциям региона (*CMIP6 ESGF Node*).

3. Диапазон возможных изменений. Три сценария охватывают весь диапазон прогнозируемых климатических и социально-экономических изменений – от «зелёного» (*SSP1-2.6*) до «ископаемого» (*SSP5-8.5*), что позволяет оценить «вилку» возможных сценариев (*IPCC AR6, 2021*).

Важно подчеркнуть, что прогнозные сценарии являются комплексными: изменение климата и изменение хозяйственной деятельности моделируются одновременно. Это позволяет учесть разнонаправленное влияние природных и антропогенных факторов.

В модели ЛГМ-2 изменение климата учитывается через корректировку слоёв стока (Y_{ij}) для различных типов ландшафтов. Для этого используются прогнозные значения осадков и температуры, полученные по ансамблю моделей CMIP6 для каждого сценария SSP. В свою очередь, изменение хозяйственной деятельности задаётся через корректировку концентраций биогенов (C_{ij}) и площадей угодий (F_i) в соответствии с прогнозными значениями.

Такой подход позволяет учесть разнонаправленное влияние природных и антропогенных факторов и получить наиболее достоверные прогнозные оценки диффузного стока биогенных элементов.

Результаты прогнозных расчетов.

Результаты моделирования диффузного стока азота и фосфора по сценариям *SSP2-4.5* и *SSP5-8.5* к 2050 г. представлены в табл.24.

Таблица 24.

Прогнозируемые значения диффузного стока азота и фосфора по сценариям *SSP2-4,5* и *SSP5-8,5* к 2050 г.

Наименование	Диффузный сток (2002-2022 гг.)	Диффузный сток при сценарии <i>SSP2-4.5</i> (умеренный)	Диффузный сток при сценарии <i>SSP5-8.5</i> (максимальный)
Изменение стока, %	-	+3...+5	+5...+7
Азот, т			
Камское	17181	16968	17076
Воткинское	2132	2114	2141
Нижекамское	33502	32700	32688
Фосфор, т			
Камское	1391	1369	1382
Воткинское	156	155	158
Нижекамское	2036	1978	2001

Анализ табл. 24 позволяет сделать следующие выводы.

1. Снижение диффузного стока на фоне роста водности. При реализации обоих сценариев (и умеренного *SSP2-4.5*, и максимального *SSP5-8.5*) ожидается снижение массы выноса азота и фосфора по сравнению с базовым периодом 2002–2022 гг. Для азота снижение составит 0,6–2,4%, для фосфора – 0,6–2,8%. Наиболее заметное снижение прогнозируется для Нижекамского водохранилища (до –2,4% по азоту и –2,8% по фосфору). Этот результат является нетривиальным, поскольку ожидаемый рост годового стока (на 3–7%) должен был бы привести к увеличению выноса. Причина заключается в том, что **социально-экономические факторы (сокращение сельскохозяйственной деятельности)** «перевешивают» **климатические (рост стока)**.

2. Объяснение «парадокса». Прогнозируемое сокращение поголовья скота на 10–15% (*SSP2-4.5*) и на 30–40% (*SSP5-8.5*) приводит к уменьшению

поступления органических удобрений на поля и, соответственно, к снижению выноса биогенов. Кроме того, сокращение площадей пашни и перевод части угодий в залежь также снижают эрозионный смыв. В условиях сценария *SSP5-8.5*, несмотря на максимальный рост водности, именно максимальное сокращение сельскохозяйственной деятельности обеспечивает наиболее выраженное снижение выноса (или, по крайней мере, его стабилизацию на уровне ниже базового).

3. Исключение: Воткинское водохранилище. Для Воткинского водохранилища прогнозируется небольшой положительный прирост выноса азота (+0,4% по сценарию *SSP5-8.5*) и фосфора (+1,3% по тому же сценарию). Это связано с локальными особенностями землепользования на его водосборе. Частный водосбор Воткинского водохранилища имеет площадь всего 16 000 км², и на его территории расположены крупные промышленные центры (г. Пермь, г. Краснокамск), где сокращение сельскохозяйственной деятельности происходит менее интенсивно, а точечные сбросы сохраняются на стабильном уровне. Кроме того, водосбор Воткинского водохранилища в меньшей степени затронут процессами депопуляции сельских территорий. Тем не менее, абсолютный прирост остаётся незначительным (в пределах 1,3%).

4. Сравнение с Верхневолжским каскадом. Полученные результаты согласуются с аналогичными прогнозными расчётами для Верхневолжского каскада водохранилищ (Кашутина и др., 2024). Для Чебоксарского водохранилища также было выявлено, что при реализации сценария *SSP5-8.5* рост стока компенсируется сокращением антропогенной нагрузки, и диффузный сток стабилизируется или снижается. Это позволяет говорить о региональной закономерности: в условиях прогнозируемого сокращения сельского хозяйства на Европейской территории России климатически обусловленный рост водности не приведёт к пропорциональному росту биогенной нагрузки.

Факторный анализ: климат антропогенная нагрузка.

Для количественной оценки вклада различных факторов в прогнозируемое изменение диффузного стока был проведён факторный анализ. Рассматривались три группы факторов: (1) климатические (изменение слоя стока и его сезонного распределения), (2) агрогенные (изменение площадей пашни и поголовья скота), (3) урбанизационные (изменение площади непроницаемых поверхностей).

Анализ показывает, что климатический фактор (рост стока) вносит положительный вклад в изменение выноса (+3...+5%). Однако этот вклад полностью нивелируется отрицательным вкладом агрогенного фактора (-5...-7%), обусловленным сокращением поголовья скота и площадей пашни. Вклад урбанизационного фактора незначителен (менее 0,5%). Таким образом, ключевым фактором, определяющим будущую диффузную нагрузку, является не столько изменение климата, сколько **трансформация хозяйственной деятельности, прежде всего в аграрном секторе**. Этот вывод имеет важное практическое значение: он означает, что управление диффузным загрязнением в XXI веке может быть более эффективным через воздействие на сельскохозяйственную политику, чем через попытки адаптации к климатическим изменениям.

Неопределённости прогноза и направления дальнейших исследований.

Прогнозные расчёты сопряжены с рядом неопределённостей, которые следует учитывать при интерпретации результатов.

Неопределённость климатических проекций. Сценарии СМIP6 имеют разброс прогнозных значений стока в зависимости от модели общей циркуляции атмосферы и океана. Использованный ансамбль из 9 моделей даёт разброс прогнозных значений годового стока для бассейна Камы в пределах $\pm 10\%$. В расчётах использовались осреднённые значения, однако при реализации экстремально сухих или экстремально влажных сценариев отклонения могут быть выше.

Неопределённость социально-экономических трендов. Прогнозы сокращения сельскохозяйственной деятельности могут быть скорректированы в случае реализации государственных программ поддержки сельского хозяйства, направленных на импортозамещение. В этом случае площади пашни и поголовье скота могут не сократиться, а, напротив, вырасти. Такой сценарий («ренессанс сельского хозяйства») требует отдельного моделирования и не рассматривался в данной работе ввиду его низкой вероятности на период до 2050 г.

Неопределённость, связанная с внутриводоёмными процессами. Как отмечалось выше, ЛГМ-2 не учитывает внутриводоёмные процессы трансформации биогенов. В условиях прогнозируемого потепления климата и увеличения продолжительности вегетационного периода эти процессы могут усилиться (например, более интенсивное потребление фосфора фитопланктоном). Это означает, что фактическое снижение массы биогенов в воде водохранилищ может быть даже более значительным, чем прогнозируемое снижение их поступления с водосбора, за счёт более эффективной самоочистки. Данное направление требует дополнительных исследований.

Несмотря на указанные неопределённости, полученные результаты позволяют с уверенностью утверждать, что к 2050 г. диффузный сток биогенных элементов в водохранилища Камского каскада не претерпит катастрофического роста. Напротив, ожидается его стабилизация или умеренное снижение на фоне прогнозируемого сокращения сельскохозяйственной деятельности.

5.4. Рекомендаций по внедрению природоохранных мероприятий

На основе выполненных ретроспективных расчётов и прогнозных сценариев разработан комплекс природоохранных мероприятий, направленных на снижение диффузного загрязнения водохранилищ Камского

каскада. Основным принципом при разработке рекомендаций стало применение **природоподобных (nature-based) технологий** – решений, имитирующих или восстанавливающих естественные экосистемные процессы (European Commission, 2020; Nature-Based Solutions Initiative, 2021). В отличие от традиционных инженерных подходов (глубоководный выпуск очищенных сточных вод, бетонирование русел), природоподобные технологии не только снижают антропогенную нагрузку, но и одновременно укрепляют экологическую устойчивость ландшафтов, способствуют сохранению биоразнообразия и повышают адаптационный потенциал территорий к изменению климата.

Обоснование выбора природоподобных технологий

Природоподобные технологии обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными инженерными решениями (Cohen-Shacham et al., 2016; Kabisch et al., 2017; Данилов-Данильян и др., 2020):

1. **Многофункциональность.** Одно решение может одновременно решать задачи водоочистки, сохранения биоразнообразия, адаптации к климату (регулирование стока, снижение теплового стресса) и рекреации.
2. **Низкие эксплуатационные расходы.** После создания такие системы требуют минимального обслуживания по сравнению с очистными сооружениями.
3. **Устойчивость к изменению климата.** Природоподобные системы адаптивны и саморегулируемы; они не выходят из строя при экстремальных паводках или засухах, а лишь меняют режим функционирования.
4. **Соответствие международным и национальным стратегиям.** Природоподобные технологии включены в Рамочную программу ООН по сохранению биоразнообразия (Глобальная рамочная программа по сохранению биоразнообразия на период после 2020 г.), а также в национальный проект «Экология» и Стратегию развития водного хозяйства РФ до 2030 г.

Ниже представлены рекомендации, дифференцированные по типам ландшафтов и источникам нагрузки, с учётом специфики каждого из трёх водохранилищ Камского каскада.

Мероприятия для сельскохозяйственных ландшафтов (приоритет – Нижнекамское водохранилище).

Как показано в табл. 22, именно сельскохозяйственные ландшафты вносят определяющий вклад в диффузную нагрузку – до 72% по азоту и фосфору. Особенно остро эта проблема стоит для Нижнекамского водохранилища, где доля пашни в частном водосборе достигает 57%.

Агролесомелиоративные мероприятия. Основным рекомендуемым мероприятием является создание **буферных прибрежных зон** (buffer strips) вдоль постоянных и временных водотоков первого-второго порядка (Mander et al., 2019; Kronvang et al., 2005; Bragina, 2020). Буферные зоны представляют собой полосы многолетних трав, кустарников и древесных пород шириной 10–15 м, залуженные без применения удобрений. Они выполняют несколько функций (Hill, 2019; Ясинский и др., 2020):

- задерживают до 60–80% взвешенных веществ, выносимых с полей;
- сорбируют биогенные элементы (азот и фосфор) за счёт корневых систем растений;
- увеличивают инфильтрацию воды в грунт, снижая пиковые нагрузки на речную сеть;
- служат местообитанием для опылителей и других полезных организмов.

Оптимальная ширина буферных зон для условий бассейна Камы, согласно рекомендациям (Ясинский и др., 2023), составляет 10–15 м. При уклоне склона более 3° ширина должна быть увеличена до 20 м. Для водосбора Нижнекамского водохранилища, где преобладают пологие склоны (уклоны 1–2°), достаточно ширины 10 м. Для водосбора Камского водохранилища, где склоны более крутые (всхолмлённый рельеф), рекомендуется ширина 15–20 м.

Агротехнические меры. Наряду с буферными зонами рекомендуется внедрение следующих агротехнических приёмов (Hoffmann et al., 2019; Sharpley et al., 2018; Раткович и др., 2016):

- **Оптимизация норм и сроков внесения минеральных удобрений.** Снижение норм внесения азотных удобрений на 20–30% (с 100–130 кг д.в./га до 70–100 кг д.в./га) на наиболее интенсивно используемых полях (Татарстан, юг Удмуртии). Внесение удобрений должно быть перенесено с осени на весну (перед посевом) и проводиться дробно, с учётом фазы вегетации культур. Это снижает вымывание нитратов в периоды снеготаяния и осенних дождей.

- **Внедрение точного земледелия (precision farming).** Использование ГИС-технологий для дифференцированного внесения удобрений в зависимости от содержания питательных веществ в почве, а также от рельефа. Это позволяет избежать переудобрения и снизить вынос биогенов на 15–25%.

- **Внедрение севооборотов с многолетними травами.** Включение в севооборот многолетних бобовых трав (клевер, люцерна) не только обогащает почву азотом (снижая потребность в минеральных удобрениях), но и улучшает структуру почвы, снижая эрозию. Рекомендуемая доля многолетних трав в севообороте – не менее 20%.

Мероприятия для урбанизированных территорий (приоритет – Воткинское водохранилище).

Воткинское водохранилище испытывает максимальную техногенную нагрузку от промышленных центров (г. Пермь, г. Краснокамск). Как показано в табл. 22, в маловодные годы доля точечных сбросов в общем балансе азота достигает 75%, а фосфора – 52%. Основной проблемой является не столько очистка хозяйственно-бытовых сточных вод (централизованные очистные сооружения функционируют), сколько **неорганизованный ливневой сток** с городских территорий и промышленных площадок, а также утечки в сетях канализации.

«Зелёная инфраструктура» в городах. Для снижения загрязнения ливневого стока рекомендуется внедрение следующих природоподобных решений (Fletcher et al., 2015; ЕС, 2018; Kabisch et al., 2017):

- **Дождевые сады (rain gardens).** Это специально спроектированные понижения в ландшафте, заполненные водопроницаемым грунтом и влаголюбивыми растениями. Они аккумулируют ливневый сток с прилегающих водонепроницаемых поверхностей (крыш, парковок, дорог) и обеспечивают его инфильтрацию и биофильтрацию. Одна из основных зон внедрения – новые жилые кварталы в г. Перми (районы «Парковый», «Ива»), а также прилегающие к водотокам (р. Егошиха, р. Данилиха) территории.

- **Биофильтры (биодренажные системы).** Представляют собой канавы или лотки, заполненные гравием, песком и растительным грунтом, через которые фильтруется ливневый сток. Эффективно задерживают взвешенные вещества, нефтепродукты и тяжёлые металлы. Рекомендуется устраивать вдоль крупных автомагистралей (трасса М-7 «Волга» на подъезде к Перми, объездная дорога вокруг г. Перми).

- **Проницаемые покрытия.** Замена асфальтобетонных покрытий на проницаемые (брусчатка, резиновая плитка, газонные решётки) на парковках, тротуарах и площадках временного хранения автотранспорта. Это снижает объём ливневого стока на 40–60%. Рекомендуется в первую очередь на территориях, прилегающих к водотокам, впадающим в Воткинское водохранилище (р. Мулянка, р. Ласьва).

Модернизация ливневой канализации. В существующих городских районах необходимо провести инвентаризацию выпусков ливневой канализации и обеспечить их оборудование локальными очистными сооружениями (песколовки, нефтеуловители). Особое внимание следует уделить выпускам в черте г. Перми, где концентрация нефтепродуктов и взвешенных веществ в ливневом стоке регулярно превышает ПДК в 5–10 раз.

Мероприятия для сельской местности (все водосборы).

Как показано в табл. 22, прямая антропогенная нагрузка (от животноводства и неканализованного сельского населения) даёт существенный вклад в общий баланс биогенов: до 16% по азоту и 61% по фосфору на Нижнекамском водосборе, до 17% по азоту и 36% по фосфору на Воткинском. Основные источники – необорудованные выгребы, открытые навозохранилища, скотные дворы без систем сбора и утилизации стоков (HELCOM, 2018; СКИОВО, 2014).

Локальные очистные сооружения в сельских населённых пунктах. Рекомендуются строительство локальных очистных сооружений (ЛОС) биологической очистки в сельских населённых пунктах, не подключённых к центральной канализации (HELCOM, 2018; Брюханов и др., 2016). Наиболее эффективны установки типа «топас», «астра», «биотанк», обеспечивающие степень очистки по БПК₅ и азоту аммонийному до 95–98%.

Модернизация животноводческих ферм. На животноводческих комплексах необходимо внедрить системы отдельного сбора твёрдой и жидкой фракции навоза с последующим использованием в качестве органических удобрений (HELCOM, 2018; Брюханов и др., 2016). Жидкую фракцию следует хранить в закрытых ёмкостях (бетонированных лагунах с защитой от инфильтрации) и вносить на поля только в весенне-летний период, избегая осеннего и предзимнего внесения. Приоритетные фермы: свинокомплексы в Пермском крае (ООО «Пермский свинокомплекс», АО «Краснокамский мясокомбинат») и Татарстане (АО «Холдинговая компания «Ак Барс»).

Информационно-аналитическое обеспечение.

Разработанные в диссертации подходы и расчёты могут быть использованы для совершенствования системы государственного мониторинга и управления водными ресурсами (Ясинский и др., 2023; Данилов-Данильян и др., 2020).

1. Интеграция расчётных показателей ЛГМ-2 в систему государственного экологического мониторинга. В настоящее время система мониторинга Росгидромета и Росводресурсов не включает оценку диффузного стока. Предлагается дополнить программу наблюдений расчётными модулями стока биогенных элементов (т/год с 1 км²) для каждого водохозяйственного участка. Это позволит перейти от констатации факта загрязнения («вода грязная») к выявлению его причин («загрязнение формируется за счёт смыва с полей в бассейне реки X»).

2. Разработка «дорожных карт» по снижению диффузной нагрузки для субъектов РФ. На основе выполненных расчётов могут быть разработаны региональные целевые показатели по снижению выноса биогенов (HELCOM, 2018; Стратегия развития водного хозяйства РФ до 2030 г.). Для Республики Татарстан (бассейн Нижнекамского водохранилища) целевой показатель по снижению выноса фосфора к 2030 г. может составить 15–20%, для Пермского края (бассейн Камского и Воткинского водохранилищ) – 10–15%, для Удмуртской Республики – 10–12%.

3. Создание системы раннего предупреждения о возможных экстремальных значениях загрязняющих веществ. На основе данных дистанционного зондирования (снегозапасы, температура воздуха) и прогнозных моделей (СМIP6) можно за 2–3 недели прогнозировать риск экстремально высокого смыва биогенов в период весеннего половодья (Sidorova, Yasinsky, 2024; Ясинский и др., 2023). Это позволит своевременно скорректировать режим сработки водохранилищ (увеличить сброс для «разбавления» загрязнения) и предупредить водопользователей о возможном ухудшении качества воды.

Ожидаемые экологические и экономические эффекты.

Реализация предложенных мероприятий позволит достичь следующих результатов:

- **Снижение диффузного стока азота** на 15–25% в бассейне Нижнекамского водохранилища и на 10–15% в бассейнах Камского и Воткинского водохранилищ.

- **Снижение диффузного стока фосфора** на 20–30% в бассейне Нижнекамского водохранилища и на 15–20% в бассейнах Камского и Воткинского водохранилищ.

- **Улучшение качества воды** в водохранилищах Камского каскада: снижение класса УКИЗВ с 3а («загрязнённая») до 2 («слабо загрязнённая») для Нижнекамского водохранилища и с 3а до 3б («очень загрязнённая» до «загрязнённая») для Камского и Воткинского (при сохранении текущих объёмов точечных сбросов).

- **Экономический эффект** за счёт сокращения затрат на водоподготовку для промышленных предприятий и населённых пунктов (г. Пермь, г. Ижевск, г. Набережные Челны) ориентировочно составит 50–100 млн руб./год при полной реализации мероприятий.

Предложенные рекомендации могут быть реализованы в рамках федерального проекта «Оздоровление Волги» (на период до 2030 г.) и региональных программ в области охраны окружающей среды.

Заключение

В результате проведенных исследований достигнута цель диссертации – выявлены закономерности формирования гидролого-геохимических процессов на водосборах Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ в условиях изменчивости водности и растущей антропогенной нагрузки. На основе комплексного анализа и адаптации ландшафтно-гидрологической модели (ЛГМ-2) были получены следующие ключевые выводы:

1. Водный и гидрохимический режим водохранилищ Камского каскада определяется как природными факторами, так и особенностями каскадного регулирования. Камское водохранилище выступает в роли регулятора, Воткинское – сопряжённого звена, а Нижнекамское – разорванного транзитного узла с высокой долей бокового притока (в основном от р. Белой). Несмотря на различия в режиме, качество воды во всех трёх водохранилищах в 2002-2022 гг. по удельному комбинаторному индексу (УКИЗВ) менялось от «слабо загрязнённых» до «загрязнённых». Устойчивое превышение ПДК_{р.х.} по железу, меди, ХПК и фенолам, а также высокий фон аммоний-иона и БПК₅ свидетельствуют о постоянной биогенной нагрузке.

2. С применением адаптированной ЛГМ-2 выполнен детальный анализ пространственно-временной изменчивости диффузного стока с учетом ландшафтной дифференциации и типов хозяйственного освоения водосборов водохранилищ Камского каскада. Расчёты по модели показывают, что основными источниками поступления азота и фосфора являются лесные угодья (53% и 57% соответственно) на Камском водохранилище. Сельскохозяйственные ландшафты (77% и 74% соответственно), на Нижнекамском водохранилище, при этом их доминирование не зависит от водности года. На Воткинском водохранилище преобладает вклад с сельскохозяйственных угодий с уплотненной почвой и лесных ландшафтов. Также значителен вынос с территорий с высокой долей непроницаемых

поверхностей, к которым относятся городские агломерации, промышленные площадки и дорожная сеть.

3. Адаптированная ЛГМ-2 позволяет достоверно оценивать пространственно-временную изменчивость диффузного загрязнения с учётом ландшафтной мозаичности, землепользования и антропогенной нагрузки. Модель верифицирована по данным Камского БВУ и демонстрирует высокую согласованность с наблюдаемыми массами загрязняющих веществ в водохранилищах. Разработанное ГИС-обеспечение позволяет автоматизировать расчёт выноса биогенов в тоннах по каждому водосбору. Сравнение ландшафтного диффузного стока, прямой антропогенной нагрузки на водосбор и контролируемых сбросов выявило пространственную дифференциацию источников загрязнения исследуемых водохранилищ: преимущественную ландшафтную нагрузку (58-82% суммарного выноса) на Камском; смешанный тип с высокой динамичностью источников и доминированием промышленно-коммунальных сбросов в средние и маловодные годы (39-75%) на Воткинском; смешанный тип с преобладанием ландшафтного выноса в средние и многоводные годы (47-53%) и прямой антропогенной нагрузки (49-61%) в маловодные годы на Нижнекамском водохранилищах.

4. Выполнено сценарное прогнозирование на период до 2050 г. с использованием климатических проекций *CMIP6* и социально-экономических сценариев (ССЭР). Вопреки ожидаемому росту годового стока на 3-5% при реализации сценария *SSP2-4.5*, прогнозные расчеты показывают сокращение диффузного выноса биогенных элементов. Установлено, что данный эффект обусловлен доминированием социально-экономических факторов над климатическими: прогнозируемое сокращение поголовья скота на 10-15% и стабилизация площадей пашни в рамках сценариев развития сельского хозяйства приводят к снижению антропогенной нагрузки на водосборы, что нивелирует и даже «перевешивает» эффект от увеличения водности и изменения структуры стока.

Выявленный парадокс – снижение диффузного стока на фоне роста водности – подтверждает, что ключевым фактором формирования будущей биогенной нагрузки является не столько изменение климата, сколько трансформация хозяйственной деятельности, прежде всего в аграрном секторе. При этом полученный результат находится в пределах точности расчетов самой используемой модели (ЛГМ-2).

Для снижения диффузного загрязнения и повышения устойчивости водохранилищ к климатическим рискам предложен комплекс природоподобных мероприятий, включающий создание буферных зон, внедрение точного земледелия, «зелёной инфраструктуры» в городах и локальных очистных сооружений в сельской местности. Эти меры соответствуют принципам устойчивого развития, имеют низкие эксплуатационные затраты и высокую экологическую эффективность, что делает их приоритетными для внедрения в практику управления водными ресурсами в бассейне реки Камы.

Список используемой литературы

Нормативно-правовые документы и стандарты

1. Водный кодекс Российской Федерации: федер. закон от 03.06.2006 № 74-ФЗ (ред. от 08.08.2024). – Москва: Российская газета, 2006.
2. Временные методические указания, по комплексной оценке, качества поверхностных и морских вод: утв. Госкомгидрометом СССР 22.09.1986 г. № 250-1163. – Москва: Госкомгидромет СССР, 1986. – 5 с.
3. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям: РД 52.24.643-2002. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2003. – 49 с.
4. О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года: Указ Президента РФ от 07.05.2018 № 204. // Собрание законодательства РФ. – 2018. – № 20. – Ст. 2817.
5. Об утверждении Стратегии развития водного хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года: распоряжение Правительства РФ от 28.12.2022 № 4203-р. // Собрание законодательства РФ. – 2023. – № 2. – Ст. 487.
6. Правила использования водных ресурсов Камского и Воткинского водохранилищ на р. Каме. – Москва: Федеральное агентство водных ресурсов, 2016. – 202 с.
7. Правила использования водных ресурсов Нижнекамского водохранилища на р. Каме. – Москва: Федеральное агентство водных ресурсов, 2014. – 132 с.
8. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». – Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 № 45203.

9. СП 131.13330.2020. Строительная климатология: свод правил. – Москва: Минстрой России, 2020. – 228 с. – (Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*).

10. СП 529.1325800.2023. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – Москва: Минстрой России, 2023. – 110 с.

Книги, монографии, сборники

11. Атлас Пермского края / коллектив авторов. – Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2012. – 124 с.

12. Бобровицкая, Н. Н. Исследование и расчет смыва почвы со склонов / Н. Н. Бобровицкая. // Сборник работ по гидрологии. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1977. – № 12. – С. 93–99.

13. Буторин, Н. В. Донные отложения верхневолжских водохранилищ / Н. В. Буторин, Н. А. Зимина, В. П. Курдин. – Ленинград: Наука, 1975. – 158 с.

14. Водоохранилища Верхней Волги / рук. В. С. Дементьев. – Нижний Новгород: Верхне-Волжское БВУ, 2008. – 156 с. .

15. Водоохранилища и их воздействие на окружающую среду. – Москва: Наука, 1986. – 367 с.

16. Вуглинский, В. Г. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР / В. Г. Вуглинский. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1991. – 223 с.

17. Горбунова, К. А. Карст и пещеры Пермской области / К. А. Горбунова, В. Н. Андрейчук, В. П. Костарев, Н. Г. Максимович. – Пермь: Издательство Пермского университета, 1992. – 200 с.

18. Данилов-Данильян, В. И. Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения: коллективная монография / под рук. В. И. Данилова-Данильяна. – Москва: Российская академия наук, 2020. – 512 с. – ISBN 978-5-907036-79-6.

19. Джамалов, Р. Г. Современные ресурсы подземных и поверхностных вод европейской части России: формирование, распределение, использование / Р. Г. Джамалов, Н. Л. Фролова, М. Б. Киреева [и др.]. – Москва: ГЕОС, 2015. – 320 с. – ISBN 978-5-89118-704-7.
20. Дубровин, Л. И. Камское водохранилище / Л. И. Дубровин, Ю. М. Матарзин, И. А. Печеркин. – Пермь: Пермское книжное издательство, 1959. – 159 с.
21. Иваньковское водохранилище и его жизнь. – Ленинград: Наука, 1978. – 304 с. – (Труды Института биологии внутренних вод; № 34 (37)).
22. Калинин, В. Г. Водный режим камских водохранилищ и рек их водосбора в зимний сезон: монография / В. Г. Калинин. – Пермь: Пермский государственный университет, 2014. – 184 с. – ISBN 978-5-7944-2505-3.
23. Комлев, А. М. Закономерности формирования и методы расчетов речного стока / А. М. Комлев. – Пермь: Издательство Пермского университета, 2002. – 163 с. – ISBN 5-8241-0272-6.
24. Кондратьев, С. А. Математическое моделирование массопереноса в системе «водосбор–водоток–водоем» / С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова. – Санкт-Петербург: Нестор-История, 2019. – 247 с. – ISBN 978-5-4469-1631-5.
25. Коронкевич, Н. И. Водный баланс Русской равнины и его антропогенные изменения / Н. И. Коронкевич. – Москва: Наука, 1990. – 204 с.
26. Коротаяев, Н. Я. Почвы Пермской области / Н. Я. Коротаяев. – Пермь, 1962. – 278 с.
27. Матарзин, Ю. М. Гидрологические процессы в водохранилищах / Ю. М. Матарзин, Б. Б. Богословский, И. К. Мацкевич. – Пермь: Пермский государственный университет, 1977. – 86 с.
28. Матарзин, Ю. М. Гидрология водохранилищ: учебник / Ю. М. Матарзин. – Пермь: Пермский государственный университет, 2003. – 296 с. – ISBN 5-7944-0376-6.
29. Михайлов, С. А. Диффузное загрязнение водных экосистем / С. А. Михайлов. – Москва: Наука, 2000. – 256 с. – ISBN 5-02-003431-2.

30. Назаров, Н. Н. География Пермского края: учебное пособие. Ч. 1. Природная (физическая) география / Н. Н. Назаров. – Пермь: Пермский университет, 2006. – 139 с.
31. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Вып. 9. Ч. 1-6. Пермская, Свердловская, Челябинская, Курганская области, Башкирская АССР. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1990. – 556 с.
32. Печеркин, И. А. Геодинамика побережий камских водохранилищ. Ч. 2 / И. А. Печеркин. – Пермь: Пермский государственный университет, 1966. – 198 с.
33. Печеркин, И. А. Геодинамика побережий камских водохранилищ. Геологические процессы. Ч. 2 / И. А. Печеркин. – Пермь: Пермский государственный университет, 1969. – 308 с.
34. Печеркин, И. А. Теоретические основы прогнозирования экзогенных геологических процессов на берегах водохранилищ / И. А. Печеркин, А. И. Печеркин, В. И. Каченов. – Пермь: Пермский государственный университет, 1980. – 85 с.
35. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 10. Верхне-Волжский район. Кн. 1 / под ред. Ю. Е. Яблокова. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. – 477 с.
36. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 11. Средний Урал и Приуралье. Вып. 1. Кама. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. – 420 с.
37. Савенко, В. С. Геохимия фосфора в глобальном гидрологическом цикле / В. С. Савенко, А. В. Савенко. – Москва: ГЕОС, 2007. – 248 с. – ISBN 978-5-89118-407-7.
38. Соболев, С. В. Водоохранилища в окружающей среде: в 2 кн. Кн. 1 / С. В. Соболев. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2022. – 388 с. – ISBN 978-5-528-00469-7.

39. Схема комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Кама (СКИОВО). Кн. 1. Общая характеристика речного бассейна. – Камское БВУ, 2014. – 370 с.

40. Чикишев, А. Г. Проблемы физической географии Урала / А. Г. Чикишев. – Москва, 1966. – С. 7–84.

41. Шкляев, А. С. Климат Пермской области / А. С. Шкляев, В. А. Балков. – Пермь, 1963. – 190 с.

42. Эдельштейн, К. К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения / К. К. Эдельштейн. – Москва: ГЕОС, 1998. – 277 с. – ISBN 5-89118-054-5.

Статьи в журналах

43. Авакян, А. Б. Народнохозяйственные и экологические последствия спуска водохранилищ / А. Б. Авакян. // Гидротехническое строительство. – 1991. – № 8. – С. 1–8.

44. Балабанова, З. М. Гидрохимическая характеристика Камского водохранилища (1954-1955 гг.) / З. М. Балабанова. // Труды Уральского отделения ГОСНИОРХА. – 1961. – Т. 5. – С. 38–104.

45. Басова, Л. З. Мониторинг содержания растворенного кислорода в реках Северо-Восточного района Республики Татарстан / Л. З. Басова. // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 11. – С. 115–118.

46. Богомолов, А. В. Особенности колебаний вертикальных структур полей минерализации в Камском водохранилище в период летней межени в районе г. Березники / А. В. Богомолов, А. П. Лепихин, Ю. С. Ляхин, М. Г. Гребенева. // Горное эхо. – 2021. – № 4. – С. 3–11.

47. Болгов, М. В. Качество природных вод в каскаде волжских водохранилищ / М. В. Болгов, А. Г. Кочерян, И. П. Лебедева, С. Н. Шашков. // Аридные экосистемы. – 2008. – Т. 14, № 35-36. – С. 68–82.

48. Болгов, М. В. Управление водными ресурсами Нижней Волги в условиях климатических изменений / М. В. Болгов, А. Л. Бубер, О. В. Горелиц,

И. В. Землянов. // Изменение климата в регионе Каспийского моря. – 2022. – С. 245–247.

49. Брюханов, А. Ю. Методика определения биогенной нагрузки на водные объекты от сельскохозяйственного производства / А. Ю. Брюханов, С. А. Кондратьев, Н. С. Обломкова, А. С. Оглуздин, И. А. Субботин. // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2016. – № 89. – С. 175–183.

50. Данилов-Данильян, В. И. Проблема снижения диффузного загрязнения водных объектов и повышение эффективности водоохранных программ / В. И. Данилов-Данильян, В. О. Полянин, Т. Б. Фащевская [и др.]. // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47, № 5. – С. 503–514. – DOI: 10.31857/S0321059620050053.

51. Даценко, Ю. С. Гидрохимический режим Учинского водохранилища / Ю. С. Даценко. // Водные ресурсы. – 1984. – № 2. – С. 136–142.

52. Даценко, Ю. С. Баланс фосфора в водохранилищах сезонного и многолетнего регулирования / Ю. С. Даценко, В. В. Пуклаков. // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2023. – № 1. – С. 137–142. – DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.12.

53. Демин, А. П. Водопотребление и водоотведение в бассейне реки Волги, их влияние на качество воды / А. П. Демин. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 6. – С. 847–861. – DOI: 10.31857/S2587556623060055.

54. Калинин, В. Г. Внутригодовая изменчивость водного режима водохранилищ Камского каскада в многоводный 2019 г. / В. Г. Калинин, М. А. Фасахов, А. А. Шайдулина. // Проблемы экологии Волжского бассейна: труды 8-й Всероссийской научной конференции («Волга-2023»). – Нижний Новгород, 2023. – С. 1–6.

55. Калинин, В. Г. Особенности формирования водного режима водохранилищ Камского каскада / В. Г. Калинин, А. А. Шайдулина, М. А.

Фасахов [и др.]. // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. – 2025. – № 2. – С. 80–92.

56. Кашутина, Е. А. Диффузное загрязнение водных объектов на территории крупного города / Е. А. Кашутина, С. В. Ясинский, М. В. Сидорова. // География и природные ресурсы. – 2021. – № 3. – С. 112–120.

57. Кашутина, Е. А. Комплексный подход к оценке диффузного загрязнения в условиях климатических изменений / Е. А. Кашутина. // Водные ресурсы. – 2024. – Т. 51, № 2. – С. 205–216.

58. Кашутина, Е. А. Массовое содержание загрязняющих веществ в воде верхневолжских водохранилищ в годы разной водности / Е. А. Кашутина, С. В. Ясинский, Е. С. Гришанцева [и др.]. // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2024. – № 6. – С. 38–60.

59. Келлер, И. А. Динамика биогенных веществ в Воткинском водохранилище / И. А. Келлер, А. Б. Китаев. // Географический вестник. – 2011. – № 3. – С. 27–35.

60. Китаев, А. Б. Химический состав воды Воткинского водохранилища в условиях современной техногенной нагрузки / А. Б. Китаев, А. В. Рочев. // Географический вестник. – 2007. – № 1-2 (5-6). – С. 90–95.

61. Китаев, А. Б. Химический состав воды Камского водохранилища в начале XXI столетия / А. Б. Китаев // Фундаментальные и прикладные исследования в гидрометеорологии, водном хозяйстве и геоэкологии. – 2020. – С. 100–103.

62. Кондратьев, С. А. Оценка возможных антропогенных изменений стока и выноса биогенных элементов с малых водосборов лесной зоны на основе математической модели / С. А. Кондратьев. // Водные ресурсы. – 1990. – № 3. – С. 24–32.

63. Кондратьев, С. А. Структура поверхности водосбора как определяющий фактор биогенной нагрузки на водоем (по данным математического моделирования) / С. А. Кондратьев, А. Ю. Брюханов, А. В. Терехов. // Вопросы географии. – 2018. – № 145. – С. 89–108.

64. Коронкевич, Н. И. Сток с водосбора как источник диффузного загрязнения рек / Н. И. Коронкевич, С. В. Долгов. // Водные ресурсы. – 2017. – Т. 44, № 6. – С. 845–854.
65. Лазарева, В. И. Кислородный режим водохранилищ Волги и Камы в период потепления климата: последствия для зоопланктона и зообентоса / В. И. Лазарева, И. Э. Степанова, А. И. Цветков, Е. Г. Пряничникова, С. Н. Перова. // Труды Института биологии внутренних вод РАН. – 2018. – Вып. 81 (84). – (Гидрология, гидрохимия и растительные пигменты водохранилищ Волжского каскада). – С. 46–83. – DOI: 10.24411/0320-3557-2018-1-0005.
66. Лепихин, А. П. Особенности формирования гидрохимического режима р. Камы (Камского водохранилища) в зимний период в районе Соликамско-Березниковского промузла / А. П. Лепихин. – Текст: электронный // Географический вестник = Geographical bulletin. – 2026. – № 1 (76). – С. 68–82.
67. Микова, К. Д. Сезонные и многолетние изменения концентрации биогенных веществ в водохранилищах Камского каскада / К. Д. Микова, В. Г. Калинин, М. А. Фасахов [и др.]. // Географический вестник. – 2025. – № 1 (72). – С. 86–98. – DOI: 10.17072/2079-7877-2025-1-86-98.
68. Назаров, Н. Н. Переработка берегов равнинных водохранилищ России на современной стадии развития (конец XX в. – начало XXI в.) / Н. Н. Назаров. // География и природные ресурсы. – 2006. – № 4. – С. 12–19.
69. Поздняков, Ш. Р. Природная и антропогенная составляющие диффузной нагрузки на водные объекты / Ш. Р. Поздняков, С. А. Кондратьев. // Экология и промышленность России. – 2022. – Т. 26, № 9. – С. 34–41.
70. Раткович, Л. Д. Факторы влияния диффузного загрязнения на водные объекты / Л. Д. Раткович, В. Н. Маркин, И. В. Глазунов, С. А. Соколов. // Водное хозяйство России. – 2016. – № 5. – С. 22–31.
71. Слабунова, А. В. О проблеме диффузного загрязнения водных объектов / А. В. Слабунова, А. П. Суровикина. // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2020. – № 2 (38). – С. 124–139.

72. Фасахов, М. А. Гидролого-геохимическая оценка стока р. Тулвы / М. А. Фасахов. // Комплексные исследования водохранилищ и их водосборов: сборник научных трудов, посвященный 100-летию со дня рождения Ю. М. Матарзина. – Пермь: ПГНИУ, 2024. – С. 87–92.

73. Фащевская, Т. Б. Моделирование генетических составляющих водного и химического стока тяжелых металлов в бассейне Нижнекамского водохранилища / Т. Б. Фащевская, Ю. Г. Мотовилов, К. В. Картунова. // Водные ресурсы. – 2023. – Т. 50, № 4. – С. 492–508. – DOI: 10.31857/S0321059623040077.

74. Ясинский, С. В. Водный баланс природных зон бассейна р. Волги в разные по водности фазы многолетнего периода / С. В. Ясинский. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2015. – № 6. – С. 86–101.

75. Ясинский, С. В. Диффузное загрязнение водных объектов равнинных территорий: проблема оценки / С. В. Ясинский, Е. А. Кашутина, М. В. Сидорова. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 1. – С. 115–130. – DOI: 10.31857/S258755662301017X.

76. Ясинский, С. В. Метод оценки выноса биогенных элементов в овражно-балочную и речную сеть малой реки / С. В. Ясинский, Ф. Н. Гуров, Г. С. Шилькрот. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2007. – № 4. – С. 44–53.

77. Ясинский, С. В. Метод оценки характеристик диффузного загрязнения малых рек на основе ландшафтно-гидрологического подхода (на примере р. Истры) / С. В. Ясинский, Ф. Н. Гуров. // Водные ресурсы. – 2006. – Т. 33, № 4. – С. 452–460.

78. Ясинский, С. В. Оценка энергетической эффективности функционирования водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов в начале XXI столетия / С. В. Ясинский, И. С. Соболев, Д. Н. Хохлов [и др.]. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2023. – Т. 87, № 6. – С. 835–846. – DOI: 10.31857/S2587556623060146.

79. Ясинский, С. В. Современное состояние качества воды водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов / С. В. Ясинский, Е. С. Гришанцева, А. М. Расулова [и др.]. // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2024. – Т. 88, № 6. – С. 912–933. – DOI: 10.31857/S2587556624060067.

Статьи в сборниках конференций

80. Возняк, А. А. Масштабы и структура диффузного загрязнения Камского водохранилища / А. А. Возняк, А. П. Лепихин, Ю. С. Ляхин, А. В. Богомолов. // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды VII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Пермь: ПГНИУ, 2019. – Т. 2. – С. 34–39.

81. Кашутина, Е. А. Моделирование диффузного стока в бассейнах регулируемых рек: опыт применения для Камского каскада / Е. А. Кашутина. // Водные ресурсы и экология: материалы Международной научной конференции. – Пермь, 2025. – С. 88–92.

82. Кондратьев, С. А. Использование наблюдений на пилотных водосборах для оценки биогенной нагрузки на Волжские водохранилища / С. А. Кондратьев, С. В. Ясинский, М. В. Шмакова [и др.]. // Проблемы экологии Волжского бассейна: труды 8-й Всероссийской научной конференции («Волга-2023»). – Нижний Новгород, 2023. – С. 1–6.

83. Фасахов, М. А. Гидролого-геохимическая оценка стока загрязняющих веществ на водосборе реки Белой / М. А. Фасахов. // Формирование речного стока и методы его расчета: сборник научных трудов, посвященный 100-летию со дня рождения А. М. Комлева. – Пермь: ПГНИУ, 2025. – С. 61–66.

84. Фасахов, М. А. Изменения концентраций биогенных веществ за многолетний период в водохранилищах Камского каскада / М. А. Фасахов, К. Д. Микова, А. А. Шайдулина [и др.]. // Проблемы экологии Волжского бассейна: труды 8-й Всероссийской научной конференции («Волга-2023»). – Нижний Новгород, 2023. – С. 1–6.

85. Шайдулина, А. А. Водный режим Воткинского водохранилища на современном этапе / А. А. Шайдулина, М. А. Фасахов, В. В. Демина. // Цифровая география: материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Пермь, 2024. – С. 277–280.

86. Шайдулина, А. А. Распределение приходных и расходных компонентов водного баланса и уровня режима Камского водохранилища с момента создания до 2024 г. / А. А. Шайдулина, М. А. Петраш, М. А. Фасахов. // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Пермь, 2025. – С. 246–251.

87. Ясинский, С. В. Антропогенная нагрузка на водосбор и ее учет при оценке выноса биогенных элементов в крупный водный объект (на примере Чебоксарского водохранилища) / С. В. Ясинский, Е. А. Кашутина, М. В. Сидорова, А. Н. Нарыков. // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения: сборник научных трудов. – Нижний Новгород ; Москва: Студия Ф1, 2019. – С. 487–491.

Диссертации и авторефераты

88. Вахитов, Р. Р. Переформирование берегов Нижнекамского водохранилища: специальность 25.00.25 «Геоморфология и эволюционная география»: дис. ... канд. геогр. наук / Вахитов Рашит Рафаилович. – Казань, 2005. – 20 с. .

89. Голосов, В. Н. Эрозионно-аккумулятивные процессы в верхних звеньях флювиальной сети освоенных равнин умеренного пояса: специальность 25.00.25 «Геоморфология и эволюционная география»: автореф. дис. ... д-ра геогр. наук / Голосов Валентин Николаевич. – Москва: МГУ, 2003. – 45 с. .

90. Тимошкин, А. Д. Оценка диффузного стока с сельскохозяйственных и мелиорируемых территорий в бассейне малой реки и мероприятия по его снижению: специальность 4.1.5 «Мелиорация, водное

хозяйство и агрофизика»: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Тимошкин Алексей Дмитриевич. – Москва, 2023. – 20 с.

91. Чалов, С. Р. Речные наносы в эрозионно-русловых системах: специальность 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия»: дис. ... д-ра геогр. наук / Чалов Сергей Романович. – Москва: Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, 2021. – 358 с.

Электронные ресурсы

92. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО). – URL: <https://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 31.05.2025).

93. Водный режим рек ЕТР. – URL: <https://autolab.geogr.msu.ru/hydrograph/> (дата обращения: 20.01.2024).

94. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС). – URL: <https://fedstat.ru/> (дата обращения: 20.10.2022).

95. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России. – URL: <http://egrpr.soil.msu.ru/download.php> (дата обращения: 01.05.2025).

96. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России. – URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения: 10.02.2026).

97. Качество поверхностных вод Российской Федерации: ежегодник. – Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «Гидрохимический Институт». – URL: <https://gidrohim.com/> (дата обращения: 15.03.2026).

98. Промышленная карта РФ. – URL: <https://xn--80aegjg4adqha3a8l.xn--p1ai/map> (дата обращения: 05.11.2024). –

99. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). – URL: <https://rosstat.gov.ru/> (дата обращения: 20.10.2022).

100. Цифровая модель рельефа SRTM. – URL: <https://www.dwtkns.com/srtm30m/> (дата обращения: 20.12.2022).

OpenStreetMap: интерактивная карта мира. – URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения: 01.02.2023).

Иностранные источники

102. Arino, O. GlobCover: The most detailed portrait of Earth / O. Arino, P. Bicheron, F. Achard, J. Latham, R. Witt, J. L. Weber. – Text: direct // ESA Bulletin. – 2008. – Vol. 136. – P. 24–31.
103. Arnold, J. G. Large area hydrologic modeling with SWAT / J. G. Arnold, R. Srinivasan, R. S. Muttiah, J. R. Williams. – Text: direct // Journal of the American Water Resources Association. – 1998. – Vol. 34, № 1. – P. 73–89.
104. Cohen-Shacham, E. Nature-based Solutions to address global societal challenges / E. Cohen-Shacham, G. Walters, C. Janzen, S. Maginnis. – Gland: IUCN, 2016. – 111 p. – DOI: 10.2305/IUCN.CH.2016.13.en. – Text: direct.
105. Davis, A. P. Hydrologic performance of bioretention storm-water control measures / A. P. Davis, R. G. Traver, W. F. Hunt. – Text: direct // Journal of Hydrologic Engineering. – 2012. – Vol. 17, No 5. – P. 604–614.
106. European Commission. Nature-Based Solutions for Water Management: Guidance Document. – Brussels: European Commission, 2020. – 45 p. – Text: direct.
107. Eyring, V. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization / V. Eyring, S. Bony, G. A. Meehl, C. A. Senior, B. Stevens, R. J. Stouffer, K. E. Taylor. – Text: direct // Geoscientific Model Development. – 2016. – Vol. 9, No 5. – P. 1937–1958. – DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
108. Ferguson, B. K. Permeable pavements for stormwater management / B. K. Ferguson. – Text: direct // Journal of Green Building. – 2018. – Vol. 13, No 2. – P. 45–58.
109. Fletcher, T. D. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage / T. D. Fletcher, W. Shuster, W. F. Hunt, R. Ashley. – Text: direct // Urban Water Journal. – 2015. – Vol. 12, No 7. – P. 525–542.
110. Harbaugh, A. W. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – the Ground-Water Flow Process / A. W. Harbaugh.

– Text: direct // U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. – 2005. – 253 p.

111. HELCOM. Guidelines for the compilation of waterborne pollution to the Baltic Sea (PLC-water). – Helsinki: HELCOM, 2005. – 80 p. – Text: direct.

112. HELCOM. Recommendations for the reduction of nutrient inputs to the Baltic Sea. – Helsinki: HELCOM, 2018. – 32 p. – Text: direct.

113. Hill, A. R. Ecosystem services of riparian zones: A review of current knowledge and future research directions / A. R. Hill. – Text: direct // Journal of Environmental Management. – 2019. – Vol. 249. – 109356.

114. Hoffmann, C. C. Agricultural measures to reduce nutrient losses to surface waters / C. C. Hoffmann, B. Kronvang, J. K. Andersen. – Text: direct // Soil & Tillage Research. – 2019. – Vol. 191. – P. 1–12.

115. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. by V. Masson-Delmotte [et al.]. – Cambridge: Cambridge University Press, 2021. – 2391 p. – DOI: 10.1017/9781009157896. – Text: direct.

116. Kabisch, N. Nature-based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas: Linkages between Science, Policy and Practice / N. Kabisch, H. Korn, J. Stadler, A. Bonn. – Cham: Springer, 2017. – 256 p. – ISBN 978-3-319-56091-5. – DOI: 10.1007/978-3-319-56091-5. – Text: direct.

117. Kronvang, B. Nutrient pressures and ecological status of surface waters in the Baltic Sea catchment / B. Kronvang, E. Jeppesen, D. J. Conley, M. Søndergaard. – Text: direct // Journal of Marine Systems. – 2005. – Vol. 57, No 3-4. – P. 215–228.

118. Mander, Ü. Riparian buffer zones for reduction of nutrient loads from agricultural land / Ü. Mander, J. Tournebize, T. Tamm, J. Pärn. – Text: direct // Ecological Engineering. – 2019. – Vol. 136. – P. 106–118.

119. Nature-Based Solutions Initiative. The State of Nature-Based Solutions 2021. – Oxford: University of Oxford, 2021. –

URL: <https://www.naturebasedsolutionsinitiative.org/> (accessed: 19.04.2026). – Text: electronic.

120. Pierce, F. J. Precision agriculture and water quality protection / F. J. Pierce, P. Nowak. – Text: direct // Precision Agriculture. – 2018. – Vol. 19, No 3. – P. 567–585.

121. Sharpley, A. N. Managing agricultural phosphorus for water quality protection / A. N. Sharpley, P. J. A. Kleinman, P. Vadas. – Text: direct // Journal of Environmental Quality. – 2018. – Vol. 47, No 4. – P. 750–760.

122. Sidorova, M. Assessment of river flow future changes in the upper Volga and Kama basins based on climate modeling data / M. Sidorova, S. Yasinsky. – Text: electronic // E3S Web of Conferences. – 2024. – Vol. 555. – 01012. – URL: https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2024/85/e3sconf_rieem2024_01012/e3sconf_rieem2024_01012.html (accessed: 19.04.2026). – DOI: 10.1051/e3sconf/202455501012.

123. Sidorova, M. Selection of an Ensemble of Atmospheric and Oceanic General Circulation Models of the CMIP-6 Project for estimating possible runoff changes in the Volga and Kama basins / M. Sidorova, M. Alieva, E. Shtol, A. Oderkova, S. Yasinsky. – Text: direct // E3S Web of Conferences. – 2023. – Vol. 407. – 02011. – DOI: 10.1051/e3sconf/202340702011.

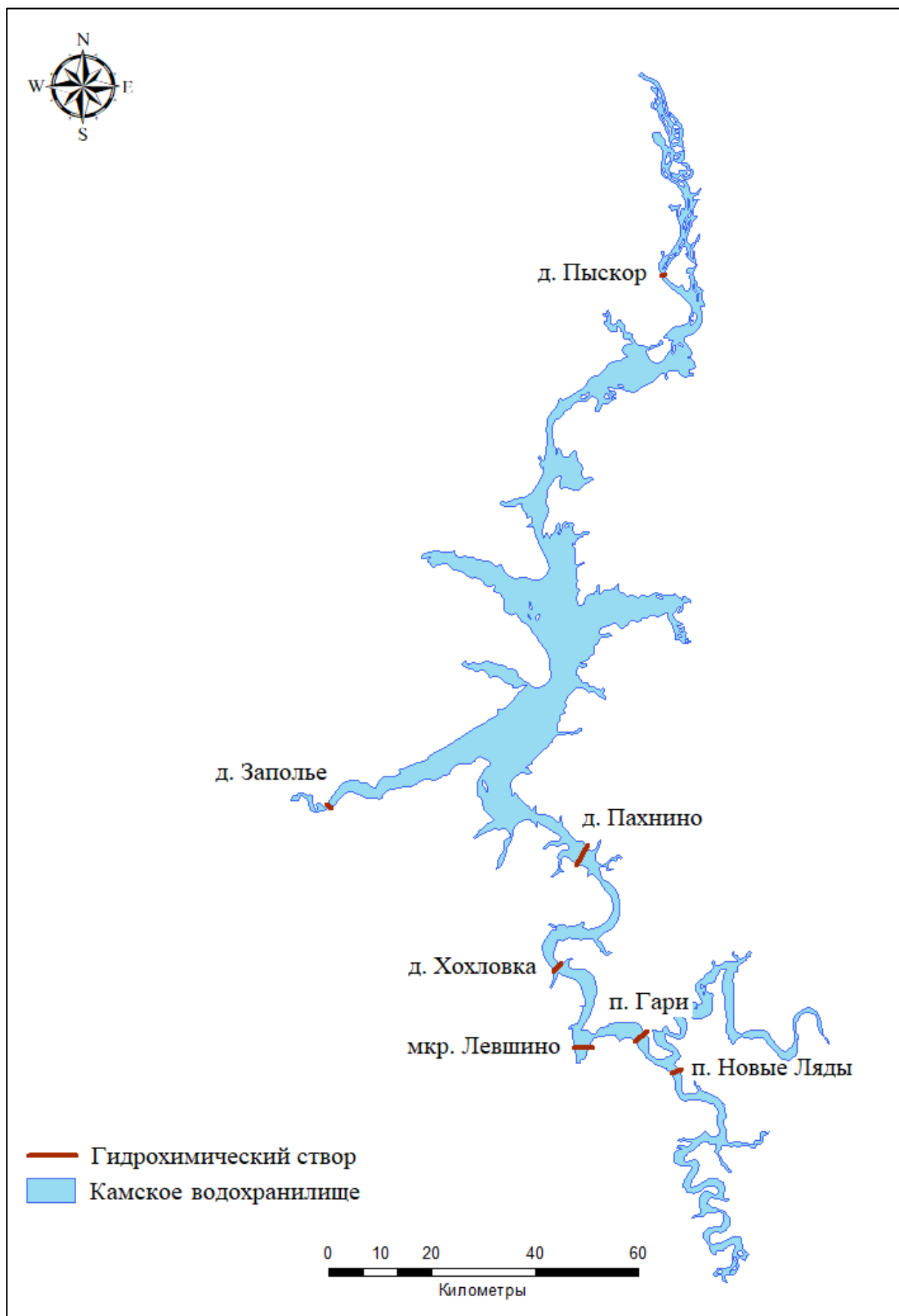
124. Yasinsky, S. V. Assessment of nutrient load on the Cheboksary Reservoir using the results of modeling runoff and removal of biogenic elements from the pilot catchments / S. V. Yasinsky, S. A. Kondratyev, M. V. Shmakova [et al.]. – Text: electronic // Limnology and Freshwater Biology. – 2024. – № 3. – P. 130–141. – URL: <http://limnolfwbiol.com/index.php/LFWB/article/view/1057> (accessed: 19.04.2026). – DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-130

Сравнительная характеристика моделей оценки загрязнения водных ресурсов

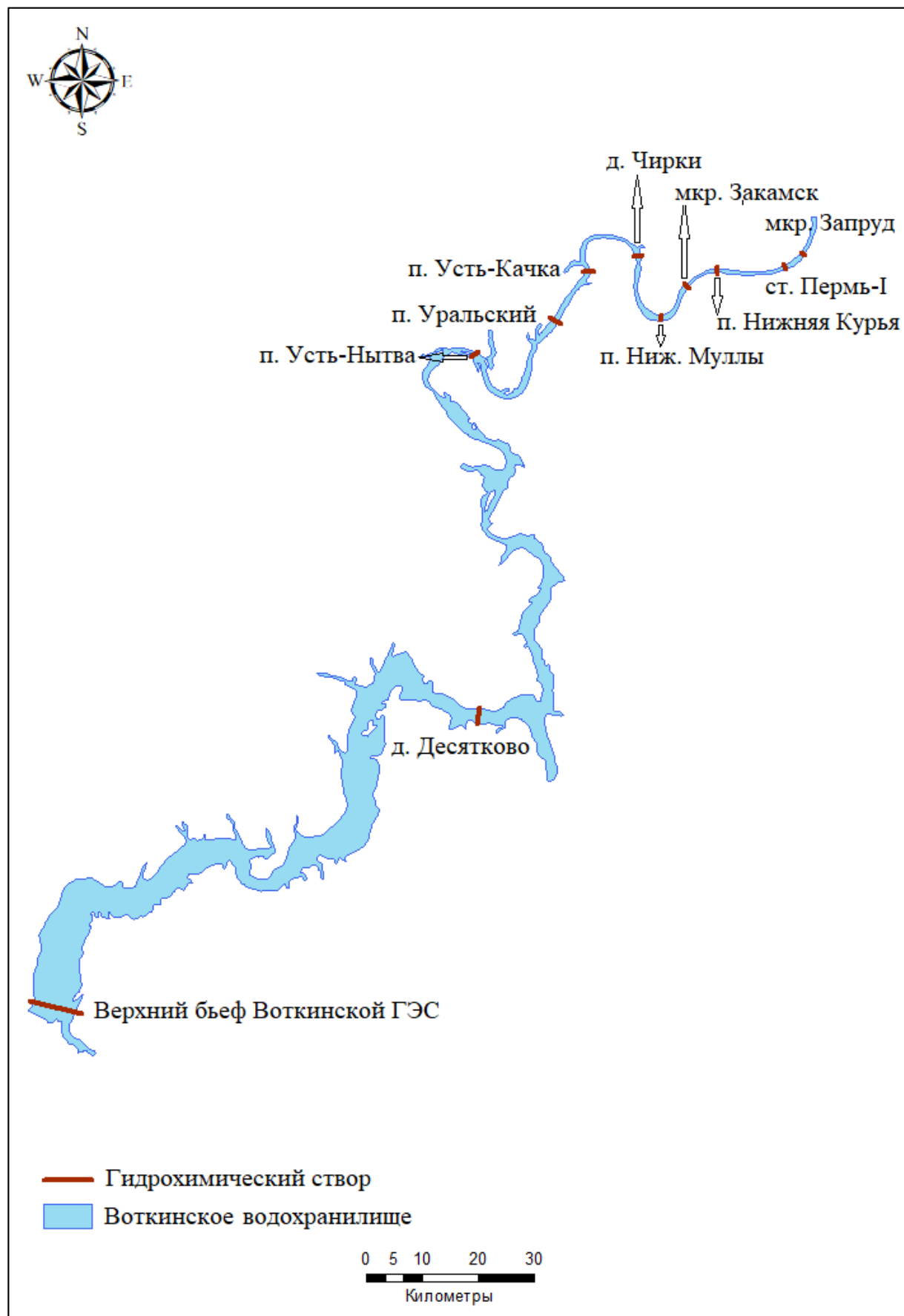
№	Модель	Разработчик / Страна	Основное назначение	Преимущества перед другими	Ключевые отличия	Учёт климата и антропогенных факторов
1	<i>SWAT(Soil & Water Assessment Tool)</i>	USDA-ARS, США	Моделирование стока, эрозии, переноса с/х загрязнителей (азот, фосфор, пестициды) в бассейнах	Открытый код, высокая детализация землепользования, большая база калибровочных данных	Фокус на сельскохозяйственных ландшафтах; слаб в городских и промышленных зонах	Климат (через метеоданные), Землепользование, удобрения, стоки
2	<i>MODFLOW</i>	USGS, США	Моделирование подземных вод, включая миграцию загрязнителей	Стандарт де-факто для гидрогеологии; модульная структура, совместимость с <i>MT3DMS</i> (перенос загрязнителей)	Только подземные воды; не учитывает поверхностный сток и биогеохимические процессы без доп. модулей	Климат (косвенно через питание), Антропогенные отборы/сбросы
3	ЛГМ-2(Ландшафтно-гидрологическая модель)	ИГРАН, Россия	Оценка формирования стока и переноса загрязнителей с учётом ландшафтной структуры	Уникальный учёт ландшафтной неоднородности и пространственной дифференциации процессов	Ориентирована на российские условия, особенно равнинные и заболоченные территории	Климат, Хозяйственная нагрузка, Ландшафтные особенности
4	<i>ECOMAG(ECOLOGICAL Model for Applied Geosystems)</i>	ИВП РАН, Россия	Моделирование водного и теплового балансов, переноса веществ в бассейнах	Интеграция с ГИС, учёт мерзлоты, адаптация к северным и холодным регионам	Хорошо работает в условиях вечной мерзлоты и слабоизученных территорий	Климат (включая мерзлоту), Лесистость, Почвенные параметры
5	Модель ИНЦ РАН им. Кондратьева	Институт озераведения РАН, Россия	Моделирование термодинамики, гидрохимии и экосистем озёр и водохранилищ	Специализация на стратификации, цветении водорослей, кислородном режиме	Фокус на стоячих водоёмах; не предназначена для рек и бассейнов	Температура воды, Поступление биогенов, Антропогенные нагрузки
6	<i>HSPF(Hydrological Simulation Program - FORTRAN)</i>	USEPA, США	Комплексное моделирование гидрологии и качества воды в городских и с/х бассейнах	Хорошо моделирует городские стоки, комбинированные системы водоотведения	Требует много входных данных; сложна в калибровке	Климат, Городская застройка, Промышленные и коммунальные стоки

7	<i>MIKE SHE / MIKE HYDRO</i>	DHI, Дания	Комплексное 3D-моделирование поверхностных и подземных вод, включая качество	Полная интеграция поверхностных и подземных вод, испарения, почвенной влаги	Высокие требования к вычислительным ресурсам и данным	Климат, Все компоненты водного цикла, Антропогенные воздействия
8	<i>GLEAMS(Groundwater Loading Effects of Agricultural Management Systems)</i>	USDA, США	Оценка влияния агротехнологий на вымывание нитратов и пестицидов в грунтовые воды	Специализация на агроландшафтах и пестицидах; проста в использовании	Только для малых участков (поле/склон), не для бассейнов	Агротехнологии, Осадки, Почвенные свойства
9	<i>WEAP(Water Evaluation And Planning System)</i>	<i>Stockholm Environment Institute</i> , Швеция	Планирование водных ресурсов с учётом качества, спроса, конфликтов	Интеграция водопользования, качества и социально-экономических сценариев	Слаб в детальном физическом моделировании гидрохимии	Климат, Водопотребление, Политика, Экономические сценарии
10	<i>QUAL2K</i>	USEPA, США	Моделирование качества воды в реках (БПК, DO, азот, температура и др.)	Проста, бесплатна, хорошо калибруется для рек; подходит для учебных и практических задач	Только 1D-реки, не учитывает бассейновые процессы и подземные воды	Сбросы, Температура, Биохимические реакции
11	<i>INCA(Integrated Catchment Model)</i>	<i>UK Centre for Ecology & Hydrology</i> , Великобритания	Моделирование азота и фосфора в бассейнах с учётом почв, растительности и стоков	Хорошо моделирует биогеохимические циклы в ответ на изменение климата и землепользования	Сложна в параметризации; требует детальных почвенных данных	Климат, Сельское хозяйство, Лесные экосистемы
12	<i>SWMM(Storm Water Management Model)</i>	USEPA, США	Моделирование ливневой канализации и загрязнения в городских условиях	Стандарт для городского дренажа; моделирует динамику загрязнителей в реальном времени	Только городские территории; не для сельских или природных бассейнов	Осадки, Инфраструктура, Типы покрытий, Загрязнители с дорожного покрытия

Место расположения точек отбора проб на Камском водохранилище



Место расположения точек отбора проб на Воткинском водохранилище



Место расположения точек отбора проб на Нижнекамском водохранилище

