

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

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт географии Российской академии наук (ИГРАН).

**Научный  
руководитель:**

**Ясинский Сергей Владимирович**  
доктор географических наук, главный  
научный сотрудник

**Официальные  
оппоненты:**

**Елена Анатольевна Минакова**  
доктор географических наук, профессор  
института фундаментальной медицины и  
биологии, высшей школа медицины, центра  
медицины и фармации, кафедры биоэкологии,  
гигиены и общественного здоровья ФГАОУ  
ВО «Казанского (Приволжский) федерального  
университета»

**Мария Алексеевна Козлова**  
кандидат географических наук, старший  
научный сотрудник, зав. лабораторией охраны  
вод Института водных проблем РАН

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт водных и  
экологических проблем Сибирского  
отделения Российской академии наук

Защита состоится « » 2026 г. в часов на заседании  
диссертационного совета 24.1.049.03 на базе ФГБУН «Институт  
географии Российской академии наук» по адресу: 119017, г. Москва,  
Старомонетный пер., 29. С диссертацией можно ознакомиться в  
библиотеке Института географии РАН по адресу: 119017, г. Москва,  
Старомонетный пер., д. 29 и на сайте Института: <http://igras.ru/defences>.

Автореферат разослан « » 2026 г.

Отзывы на автореферат (в электронном виде в формате pdf и на  
бумажных носителях в одном экземпляре, заверенные подписью и  
печатью) просим направлять по адресу 119017, г. Москва, Старомонетный  
пер, д. 29, ученому секретарю Диссертационного совета 24.1.049.03,  
Титковой Т.Б. Факс 8 (495) 959-00-33, e-mail: [titkova@igras.ru](mailto:titkova@igras.ru)

Ученый секретарь диссертационного  
совета, кандидат географических наук



Титкова Т.Б.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Водохранилища Камского каскада (Камское, Воткинское, Нижнекамское) являются ключевыми элементами водохозяйственной системы Урала и Приволжья, обеспечивают гидроэнергетику, водоснабжение, судоходство и рекреацию. 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. км<sup>2</sup>), обуславливающих водный и гидрохимический режимы 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), 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 диффузного стока реализовано в международных и отечественных моделях: *SWAT* (Arnold et al., 1998), *INCA*

(Whitehead et al., 2009), *ECOMAG* (Мотовилов, Гельфан, 2018), ландшафтно-гидрологической модели 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 биогенных веществ (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 УКИЗВ 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 РФФИ 22-17-00224 «Формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах каскадов Верхне-Волжских и Камских водохранилищ при различных сценариях землепользования и изменения 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. Верификация и валидация ЛГМ-2 за многолетний период, выполненная разработчиками (Ясинский, Кашутина, 2020) на водосборе р. Кудьмы (бассейн Чебоксарского водохранилища), показали высокую эффективность и адекватность используемой модели. Сопоставление расчетных и фактических значений выноса минерального азота выявило расхождение менее 5% (525,5 т/год против 551 т/год), что позволяет применять ЛГМ-2 для расчета выноса БВ на водосборных водохранилищах Камского каскада (с учетом региональных особенностей стока, подстилающей поверхности и условий хозяйствования). 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 164

страниц, 15 рисунков, 24 таблицы и 2 приложения. Библиографический список насчитывает 124 источника, из них 23 на иностранном языке.

**Автор выражает искреннюю благодарность** научному руководителю, д.г.н. С.В. Ясинскому, сотрудникам лаборатории гидрологии ИГ РАН, кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов ПГНИУ, а также д.г.н. В.Г. Калинин к.г.н. Е.А. Кашутиной, к.г.н. С.В. Долгову, к.г.н. А.А. Шайдудиной и к.г.н. А.Б. Китаеву за помощь, поддержку и ценные советы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, ее практическая значимость и научная новизна, сформулированы цели и задачи исследования, указан личный вклад автора, приведены сведения об апробации работы, структуре и объеме диссертации.

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

**Глава 1** содержит основные сведения о современном состоянии исследований диффузного загрязнения водных объектов, при этом отдельное внимание уделяется методам моделирования гидролого-геохимических процессов на водосборах.

В **разделе 1.1** проводится обзор литературы по классификации источников загрязнения водных объектов. В работах С.А. Михайлова (2000), Ш.Р. Позднякова и С.А. Кондратьева (2022), А.В. Слабуновой и А.П. Суровикиной (2020) подробно рассмотрены определения точечных и неточечных (диффузных) источников. Показано, что под диффузным загрязнением понимается вынос загрязняющих веществ с мозаично расположенных на водосборе источников и их трансформация в овражно-балочной и речной сети (Ясинский, Гулов, 2006). Отражены основные факторы формирования диффузного загрязнения, включая природную и антропогенную составляющие. Проанализированы виды хозяйственной деятельности, вносящие наибольший вклад в диффузное загрязнение: сельское хозяйство (эрозия пахотных земель, вынос удобрений и пестицидов), урбанизированные территории (поверхностный сток с застроенных территорий, утечки из канализационных сетей), транспорт и промышленное производство (Данилов-Данильян и др., 2020).

В **разделе 1.2** проведен обзор и сравнительный анализ отечественных и зарубежных методов моделирования диффузного загрязнения. Рассмотрены международные модели: полураspreadённая гидрологическая модель *SWAT* (Arnold et al., 1998), модель подземных вод *MODFLOW* (Harbaugh, 2005), комплексные модели *HSPF*, *MIKE SHE*, модель ливневой канализации *SWMM*. Также проанализированы отечественные разработки: модель *ECOMAG* (Институт водных проблем РАН), модель ИИЦ РАН им. Кондратьева для озёр и водохранилищ, а также ландшафтно-гидрологическая модель ЛГМ-2 (Институт географии РАН). Обоснован выбор ЛГМ-2 для оценки диффузного стока биогенных веществ с водосборов водохранилищ Камского каскада. Модель способна учитывать ландшафтную мозаичность водосборов, дифференцировать антропогенную нагрузку по типам угодий и рассчитывать вынос загрязняющих веществ с различными видами стока

(поверхностным, подповерхностным, подземным и твёрдым стоком – эрозией).

Таким образом, в **Главе 1** на основе обзора научной литературы по проблеме диффузного загрязнения водных объектов показано, что изучение диффузного загрязнения, включая природную и антропогенную составляющие, классификацию источников загрязнения (точечные и неточечные), а также особенностей поступления биогенных элементов с сельскохозяйственных, урбанизированных и промышленных территорий является важным вопросом современной науки. Их понимание позволило разработать различные методы и подходы, которые легли в основу современных моделей диффузного загрязнения. В главе 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.

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

**Глава 2** содержит характеристику природных и хозяйственных условий водосборных бассейнов Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ, а также описание исходных данных, использованных в работе.

В **разделе 2.1** приведена физико-географическая характеристика территории. Водосбор трёх водохранилищ общей площадью 370 тыс. км<sup>2</sup> охватывает бассейн Верхней, Средней и Нижней Камы, расположенный на северо-востоке Европейской части России (рис. 1). Описаны рельеф (от западной оконечности Русской равнины до склонов Уральских гор на востоке), геологическое строение (преобладают осадочные породы палеозоя, особенно пермской системы), почвенный покров (подзолистые и дерново-подзолистые почвы занимают 78% площади) и растительность (леса занимают 59% территории). Подробно охарактеризована гидрографическая сеть, включая р. Каму и созданные на ней три крупных водохранилища – Камское, Воткинское и Нижнекамское.

В **разделе 2.2** проанализированы климатические условия. На основе монографии А.С. Шкляева и В.А. Балкова (1963), данных «Научно-прикладного справочника по климату СССР» (1990) и СП 131.13330.2025 описаны температурный режим, распределение осадков (от 500-550 мм на западе до более 800 мм в год на северо-востоке), снегозапасы (убывают с севера на юг, достигая на горных участках 500 мм, а в среднем изменяются от 200 до 80 мм), промерзание почв (увеличивается с севера на юг от 50 до 100 см). Показано, что физико-географическое положение водосбора обуславливает наличие широтной зональности и высотной поясности природных процессов.

В **разделе 2.3** детально рассмотрена хозяйственная деятельность на водосборах. Показано, что сельскохозяйственные угодья занимают 132 535 км<sup>2</sup> (36% площади водосбора), при этом на водосборе Нижнекамского водохранилища сосредоточено 79% всех сельскохозяйственных полей каскада (105 357 км<sup>2</sup>, 57% от площади частного водосбора). Интенсивность

применения минеральных удобрений варьирует от 50-70 кг д.в./га в Пермском крае до 100-130 кг д.в./га в Республике Татарстан. Промышленный комплекс насчитывает более 800 предприятий, из них 512 (62%) расположены на водосборе Нижнекамского водохранилища. Урбанизированные территории включают 50 городов с населением свыше 50 тыс. человек. Описаны экологические риски, связанные с засолением рек в районе Верхнекамского месторождения калийных солей, кислыми шахтными водами ликвидированных угольных шахт Кизеловского бассейна, а также загрязнением грунтовых вод нефтепродуктами в районах нефтедобычи.

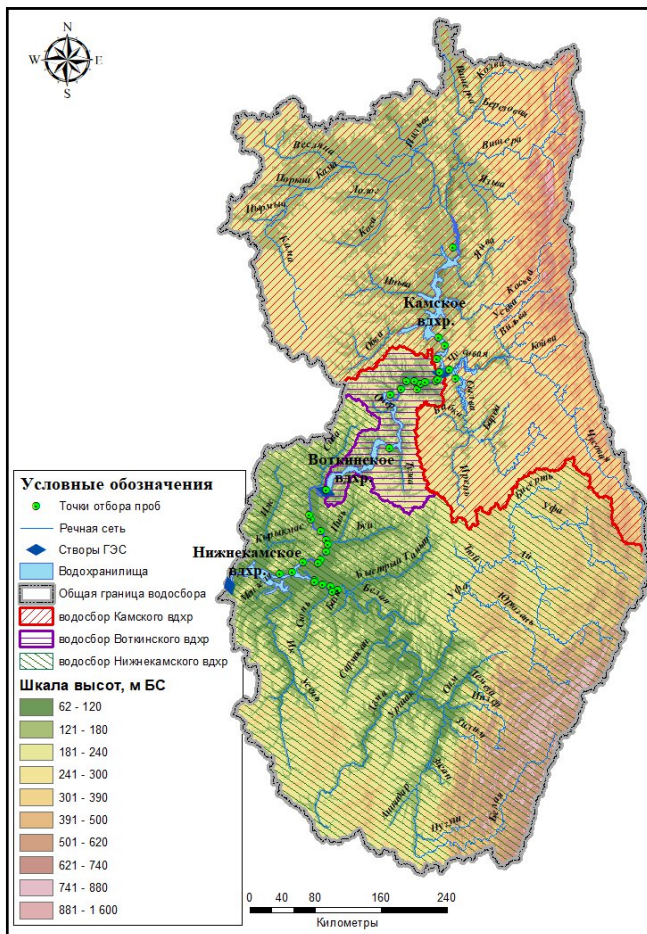


Рис. 1. Физико-географическая карта водосбора каскада Камских водохранилищ

В разделе 2.4 приведена характеристика исходных данных. Использованы ежедневные данные о притоке, сбросе и уровне воды в водохранилищах за 2002-2022 гг. с сайта <http://gis.vodinfo.ru>.

Гидрохимические данные по 20 ЗВ в Камском и Воткинском (2005-2022 гг.) и по 18 ЗВ в Нижнекамском (2003-2022 гг.) водохранилищах предоставлены Камским БУ, отбор проб проводился в 40 точках. Информация по сточным водам получена из АИС ГМВО за 2010-2022 гг. Для пространственного анализа использованы цифровая модель рельефа *SRTM* (разрешение 30 м), тематические слои *OpenStreetMap*, почвенная карта РФ масштаба 1:2 500 000. Статистические данные о хозяйственной деятельности получены из ЕМИСС и Росстата.

Таким образом, **Глава 2** посвящена характеристике природных и хозяйственных условий водосборных бассейнов Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ. Рассмотрены 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, гидрохимических, картографических материалов и статистических показателей. Все это позволило адаптировать ЛГМ-2 к условиям водосбора Нижнекамского водохранилища и в дальнейшем выполнить расчеты диффузного стока с его территории.

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

**Глава 3** посвящена анализу функционирования водохранилищ Камского каскада в нормальных и экстремальных гидрологических условиях с учётом особенностей их регулирования.

**В разделе 3.1** дана характеристика водохранилищ Камского каскада и гидрологического режима рек рассматриваемой территории. Камское водохранилище (площадь водосбора 168 тыс. км<sup>2</sup>) является регулятором каскада с напором 21,0 м и наибольшим полезным объёмом (9,83 км<sup>3</sup>). Воткинское водохранилище (площадь водосбора 184 тыс. км<sup>2</sup>) – сопряжённое звено каскада, приток к нему на 96% формируется сбросом с Камской ГЭС. Нижнекамское водохранилище (площадь водосбора 186 тыс. км<sup>2</sup>) – разорванное звено каскада с транзитным характером притока и сброса: 60% воды поступает с вышерасположенных ГЭС, 40% – с боковой приточностью, в основном с р. Белой (Матарзин, 2003; ПИВР, 2014, 2016). Описаны основные фазы гидрологического режима рек: весеннее половодье (начинается в апреле, на долю которого приходится 62% годового стока), летне-осенняя межень (24% годового стока) и зимняя межень (14% годового стока) (Комлев, 2002).

**В разделе 3.2** проведён анализ сезонных и многолетних изменений водности и уровенного режима. Согласно СП 529.1325800.2023 определены годы разной водности: средний по водности – 2014 г. (48% обеспеченность), многоводный – 2019, 2017 г., (5% и 9% обеспеченность соответственно), маловодный – 2021 г. (95% обеспеченность). Выполнен анализ внутригодового распределения притока и расхода воды для этих лет

(Калинин и др., 2025). Показано, что в многоводные годы отношение притока к сбросу в период половодья уменьшается (с 1,5 до 1,1-1,3), а в маловодные – возрастает (до 1,7). В многоводный 2017 г. высокое весеннее половодье сопровождалось наложением волн дождевых паводков с середины мая до середины июля. В многоводный 2019 г. аномально высокие летне-осенние дождевые паводки привели к тому, что впервые за всю историю существования Камской ГЭС затворы водосбросов открывались даже в ноябре. В маловодный 2021 г. приток воды в водохранилища каскада сократился на 24-28%, а сброс – на 25-28% по сравнению со средним по водности 2014 г.

Таким образом, в **Главе 3** 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. Установлено, что изменчивость водности года не нарушает общей внутригодовой структуры водного баланса, но существенно влияет на режим сработки-наполнения, который определяет условия разбавления, аккумуляции и транзита загрязняющих веществ.

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

**Глава 4** содержит анализ пространственно-временной изменчивости гидролого-геохимических характеристик водохранилищ Камского каскада.

В **разделе 4.1** рассмотрены изменения концентраций загрязняющих веществ. Проанализировано поступление биогенных веществ со сбросами сточных вод предприятий, которое показало, что большая часть веществ попадает в основном в Камское водохранилище – 51%. Анализ данных АИС ГМВО за 2010-2022 гг. показал, что наибольшее количество азота общего поступает в Камское водохранилище – 38 399 т/год, что составляет 70% от величины общего поступления в Камские водохранилища (Микова и др., 2025). Для азота общего и фосфатов выполнено сравнение величин, движущихся из разных источников. На Камском и Воткинском водохранилищах наибольшее поступление азота общего и фосфатов происходит за счет сброса сточных вод в водные объекты (70% и 31% соответственно). Наибольшее поступление азота общего и фосфатов от всех источников на Нижнекамском водохранилище – 61% и 84% соответственно, где сосредоточены обширные площади сельскохозяйственных угодий – 105 357 км<sup>2</sup>, что составляет 79% от общей площади всех сельскохозяйственных полей на водосборе Камских водохранилищ.

Анализ концентраций биогенных веществ в воде Камских водохранилищ, осредненных по сезонам водности, показал, что наибольшие концентрации аммоний-иона наблюдаются в весенний период (0,35-0,41 мг/л), а фосфатов – в период зимней сработки (0,026-0,031 мг/л). Концентрации железа общего превышают ПДКр.х. в 1,1-4,7 раза во все сезоны, снижаясь по длине каскада от верховьев Камского водохранилища (9,7 ПДКр.х.) к Нижнекамскому (0,9 ПДКр.х.).

Выполнена комплексная оценка качества воды с использованием удельного комбинаторного индекса загрязнения воды (УКИЗВ) по методике РД 52.24.643-2002. Качество воды в водохранилищах Камского каскада остаётся стабильно «загрязненным» (2 класс) и «слабо загрязненным» (3а класс) (табл. 1).

Таблица 1

## Интегральные показатели качества воды в Камском каскаде

Водохранилище	Год	15 основных ЗВ для расчета УКИЗВ (РД 52.24.643-2002)	УКИЗВ	Класс по УКИЗВ
Камское	2014	Аммоний-ион, БПК <sub>5</sub> , железо общее, медь, нефтепродукты, никель, нитраты, нитриты, растворенный кислород, свинец, сульфаты, фенолы, хлориды, ХПК, цинк	2,71	3а
	2019		2,59	3а
	2021		2,72	3а
Воткинское	2014		2,64	3а
	2019		2,33	3а
	2021		2,86	3а
Нижнекамское	2014		2,21	3а
	2019		1,94	2
	2021		1,71	2

Ни в одном из них вода не соответствует требованиям рыбохозяйственного водопользования, установленным СанПиН и ПДКр.х. 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.

В разделе 4.2 выполнен расчет масс загрязняющих веществ в водохранилищах (по 17 показателям) для лет разной водности. Общий объём воды в каскаде 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). В многоводный 2019 г. зафиксированы минимальные значения массы легкоокисляемых органических веществ (БПК<sub>5</sub>) – сокращение более чем на 20% по сравнению с маловодным 2021 г. за счёт разбавления.

Проанализировано распределение запасов веществ между водохранилищами. Отмечена 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 и 18-21% в Нижнекамском. Выявлены две группы гидрохимических показателей. В первой группе (нитраты, сульфаты, хлориды, взвешенные вещества, БПК<sub>5</sub>, медь, железо общее) распределение веществ по водохранилищам каскада оставалось относительно стабильным вне зависимости от года. Во второй группе (аммоний-ион и нефтепродукты) распределение значительно отличается от распределения

масс воды по каскаду, сильно варьируется от года к году и обусловлено антропогенным происхождением сбросов.

Таким образом, в **Главе 4** 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.

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

**Глава 5** содержит результаты анализа гидролого-геохимических процессов на водосборах водохранилищ Камского каскада с применением ландшафтно-гидрологической модели ЛГМ-2.

В **разделе 5.1** изложена методология и адаптация модели к условиям исследуемых водосборов. ЛГМ-2 позволяет оценить поступление БВ в водный объект с учетом пространственной неоднородности ландшафтной структуры и степени антропогенной трансформации водосбора. Общая схема расчетов поступления БВ в замыкающий створ представлена на рис. 2. Диффузный сток биогенных элементов с водосбора описывается формулой (1).

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

где  $S_{ij}$  – масса БВ с  $j$ -м видом стока с  $i$ -го угодья (т);  $C_{ij}$  – концентрация БВ в стоке (мг/л);  $i$  – тип угодья (пашня, луг, лес, урбанизированная территория);  $j$  – вид стока: 1 – поверхностный склоновый, 2 – подповерхностный (верховодка), 3 – подземный; 4 – сток наносов (продуктов эрозии);  $Y_{ij}$  – слой сток с  $i$ -го угодья (мм);  $F_i$  – площадь  $i$ -го угодья на водосборе (км<sup>2</sup>);  $K_j$  – коэффициент для согласования размерностей.

Значения слоев стока ( $Y_{ij}$ ) для различных ландшафтов получены на основе региональных гидрологических зависимостей и данных многолетних наблюдений на водосборах-аналогах. Концентрации БВ ( $C_{ij}$ ) задавались дифференцированно по типам угодий с учетом удельных показателей выноса для пашни (в зависимости от массы удобрений), пастбищ (с учетом поголовья скота), лесов (фоновые значения) и урбанизированных территорий (с учетом плотности населения), согласно методикам, изложенным в работах С.В. Ясинского, Е.А. Кашутиной и др.

Для пространственного анализа и картографического обеспечения моделирования использовались методы геоинформационного картографирования (тематические слои *OpenStreetMap*, данные *Global Land Cover*, ЦМР *SRTM* (30 м) и ЕМИСС). Особое внимание было уделено адаптации ЛГМ-2 к условиям водосборных бассейнов водохранилищ р. Камы. В процессе калибровки модели был реализован уточнённый подход к пространственной привязке статистических данных: параметры

землепользования, поголовья животных, численности населения и объёмов внесения минеральных удобрений распределялись пропорционально площади той части субъекта РФ, которая непосредственно входит в границы водосбора. Калибровка и верификация модели ранее выполнены (Ясинский, Кашутина, 2020) на пилотных водосборах рр. Кудьма и Линда. Верификация показала, что расхождения расчётных и измеренных концентраций биогенов на этих водосборах не превышают 12% для минерального азота и 8% для минерального фосфора. 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).

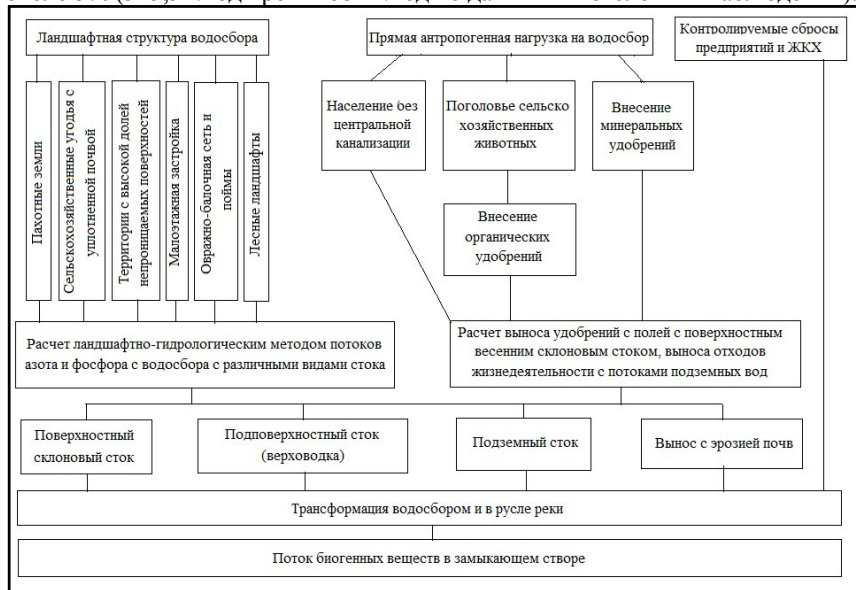


Рис. 2. Блок-схема расчета стока БВ с водосбора с учетом ландшафтной структуры и антропогенной нагрузки (Ясинский, Кашутина, 2020)

В разделе 5.2 выполнена оценка современного диффузного загрязнения водохранилищ Камского каскада. Расчёты проведены для трёх характерных по водности лет: 2014 (средний по водности), 2019 (многоводный) и 2021 (маловодный). Пространственное распределение выноса азота и фосфора по типам ландшафтов представлено в табл. 2. Анализ выноса БВ, детализированный по типам ландшафтов, подтверждает ведущую роль сельскохозяйственного освоения территорий. На долю пахотных угодий (суммарно по категориям «пахотные земли» и «сельскохозяйственные угодья с уплотненной почвой») и овражно-балочная сеть (ОБС) совокупно приходится от 58% до 72% всего диффузного поступления азота и от 57% до 72% фосфора в различные по водности годы. При этом фосфор, имеющий преимущественно эрозионную природу выноса, ожидаемо демонстрирует более высокую чувствительность к снижению водности: в маловодный 2021 г. его суммарный вынос по всем водохранилищам сократился на 51-63% относительно 2014 г.

**Таблица 2**  
**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

Наибольший вклад в диффузную нагрузку вносит ландшафт «сельскохозяйственные угодья с уплотненной почвой», который является основным источником как азота (до 70% на водосборе Нижнекамского водохранилища), так и фосфора (до 66% там же). Обращает на себя внимание резкое сокращение выноса с лесных ландшафтов в маловодный 2021 г., особенно на водосборе Нижнекамского водохранилища (уменьшение в 13,6 раз по азоту и в 15,3 раз по фосфору по сравнению с 2014 г.), что указывает на практически полное прекращение поверхностного склонового смыва в лесных массивах в условиях дефицита влаги и стока. В противоположность этому, вынос с ландшафтов уплотненных почв и ОБС, хотя и снижается значительно (в 1,7-2,2 раз), остается определяющим в структуре загрязнения даже в маловодный год, подчеркивая их роль как наиболее стабильных и антропогенно-обусловленных источников поступления БВ.

Сравнение ландшафтного диффузного стока, прямой антропогенной нагрузки на водосбор и контролируемых сбросов выявило пространственную дифференциацию источников загрязнения исследуемых водохранилищ (табл. 3). Это позволяет выделить три типа водохранилищ по характеру биогенной нагрузки. В Камском водохранилище основным источником как азота, так и фосфора выступает диффузный сток с ландшафтов. По азоту его доля составляет 58-73%, по фосфору 70-82%. Рост доли диффузного стока фосфора в Камском водохранилище в 2021 г. (до 78% по сравнению с 70% в 2019 г.) обусловлен не увеличением его абсолютных значений (они закономерно снизились с 1 215 до 596 т из-за маловодья), а более значительным (восьмикратным по сравнению с 2019 г.) сокращением

объемов контролируемых сбросов со сточными водами. Это подчеркивает нестабильность вклада точечных источников и доминирующую роль диффузного стока даже в условиях маловодья.

**Таблица 3**  
**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%)
	Нижнекамское	17929 (53%)	15656 (47%)	8 664 (38%)	809 (44%)	657 (36%)	412 (34%)
Контролируемые сбросы предприятий и ЖКХ	Камское	5 171 (23%)	6 840	5 455	103 (7%)	344 (20%)	43 (6%)
	Воткинское	4 025 (67%)	3 001 (55%)	3 814 (75%)	87 (39%)	87 (30%)	74 (52%)
	Нижнекамское	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%)
	Нижнекамское	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
	Нижнекамское	33 546	33452	23046	1 825	1 824	1 211
Суммарный вынос БВ		62 297	61925	43189	3 550	3 846	2 120

\* это процент от суммарного выноса БВ с водосбора.

На Воткинском водохранилище выявлен смешанный тип загрязнения с высокой динамичностью источников. По азоту доля диффузного стока варьирует от 9% в маловодный 2021 г. до 16% в многоводные годы, уступая точечным источникам (контролируемые сбросы дают 55-75% азота). По фосфору ситуация 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% на фоне резкого падения абсолютного выноса (с 287 до 144 т). При этом суммарные объемы точечных сбросов фосфора оставались относительно стабильными (74-87 т). Это указывает на то, что водосбор Воткинского водохранилища, несмотря на локальную концентрацию промышленности, обладает значительным потенциалом диффузного смыва, реализующимся в многоводные годы. В маловодные роль этого источника минимизируется, и на первый план выходят стабильные промышленно-коммунальные сбросы.

Соотношение источников на Нижнекамском водохранилище, напротив, отличается устойчивостью: здесь диффузный сток и прямая антропогенная нагрузка на водосбор (животноводство, удобрения) безраздельно доминируют во все рассматриваемые годы. Суммарно на их долю приходится 90-95% азота и 95-97% фосфора. Даже в маловодный 2021 г.,

когда абсолютные значения диффузного стока ожидаемо снизились, их доля в общем балансе остается высокой. Это подтверждает, что биогенная нагрузка на Нижнекамское водохранилище формируется практически полностью за счет выноса с большой площади сельскохозяйственных земель (38-53% по азоту и 36-44% по фосфору), а вклад точечных сбросов предприятий и ЖКХ здесь минимален (9-13% по азоту и 3-5% по фосфору).

Сравнительный анализ суммарного выноса биогенных элементов в годы разной водности (табл. 4) выявил четкую зависимость объемов диффузного стока от водного режима. В маловодный 2021 г. суммарный вынос азота с водосборов сократился на 16-34%, а фосфора – на 34-49% по сравнению со средним по водности 2014 г. В многоводный 2019 г. вынос азота в Камском и Нижнекамском водохранилищах оставался на уровне среднемноголетних значений (изменение в пределах 1%). 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).

Таблица 4

**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

В разделе 5.3 представлен прогноз диффузного загрязнения водохранилищ Камского каскада с учетом комплексных изменений на их водосборах. Для прогноза выноса загрязняющих веществ использованы сценарии изменения климата *СМIP6*, а изменения в хозяйственной деятельности согласованы со сценариями социально-экономического развития (ССЭР). Выбор базового периода 1971-2000 гг. обусловлен его статусом стандартного климатологического периода, рекомендованного Всемирной метеорологической организацией (ВМО). Из ансамбля моделей *СМIP6* были отобраны 9 моделей, наилучшим образом воспроизводящих современные годовые суммы осадков в регионе. Для прогнозных расчетов использованы сценарии *\*SSP2-4.5\** (умеренный) и *\*SSP5-8.5\** (максимальный). Увеличение годового стока на 3-7% (в зависимости от сценария) является одним из факторов, влияющих на прогнозные оценки.

Результаты моделирования диффузного стока азота и фосфора по сценариям *\*SSP2-4.5\** и *\*SSP5-8.5\** к 2050 г. представлены в табл. 5.

Таблица 5

**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 SSP2-4.5 (умеренный)	Диффузный сток при сценарии SSP5-8.5 (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

При реализации обоих сценариев 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 парадоксальный эффект (снижение выноса на фоне роста водности) обусловлен доминированием социально-экономических факторов над климатическими: прогнозируемое сокращение поголовья скота на 10-15% (\*SSP2-4.5\*) и на 30-40% (\*SSP5-8.5\*) и стабилизация площадей пашни приводят к снижению антропогенной нагрузки на водосборы, что нивелирует эффект от увеличения водности. Исключение составляет Воткинское водохранилище, где прогнозируется небольшой положительный прирост выноса азота (+0,4% по сценарию \*SSP5-8.5\*) и фосфора (+1,3% по тому же сценарию), что связано с локальными особенностями землепользования и менее интенсивным сокращением сельскохозяйственной деятельности.

В разделе 5.4 разработаны рекомендации по внедрению природоохранных мероприятий. Для минимизации рисков и повышения устойчивости водных объектов разработан комплекс природоохранных мероприятий, базирующийся на применении природоподобных (*nature-based*) технологий и дифференцированный по типам ландшафтов и источникам нагрузки. Основные виды природоохранных мероприятий: агролесомелиоративные мероприятия (создание буферных прибрежных зон из многолетних трав, кустарников и древесных пород вдоль рек и водоемов); агротехнические меры (оптимизация норм и сроков внесения минеральных удобрений, внедрение точного земледелия и севооборотов с многолетними травами); меры по снижению урбанизированного стока (модернизация ливневой канализации и внедрение «зеленой инфраструктуры» в городах); локальные очистные сооружения в сельской местности; информационно-аналитическое обеспечение (интеграция расчетных показателей ЛГМ-2 в систему государственного экологического мониторинга и разработка «дорожных карт» по снижению диффузной нагрузки в субъектах РФ).

Основные выводы работы сформулированы в заключении.

## 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 ПДКр.х. по железу, меди, ХПК и фенолам, а также высокий фон аммоний-иона и БПК<sub>5</sub> 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 БУ 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 СМIP6 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 ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Статьи в журналах из списка ВАК*

1. Ясинский С.В., Соболь И.С., Хохлов Д.Н., **Фасахов М.А.**, Шайдулина А.А. Оценка энергетической эффективности функционирования водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов в начале XXI века // Известия РАН. Серия географическая. 2023. Т. 87. № 6. С. 835-846. (индексируется в *Scopus*).
2. Кашутина Е.А., Ясинский С.В., Гришанцева Е.С., Расулова А.М., **Фасахов М.А.**, Шайдулина А.А. Массовое содержание загрязняющих веществ в воде Верхневолжских водохранилищ в годы разной водности // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 6. С. 38-60.
3. Ясинский С.В., Гришанцева Е.С., Расулова А.М., **Фасахов М.А.**, Шайдулина А.А., Кашутина Е.А. Современное состояние качества воды водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов // Известия РАН. Серия географическая. 2025. Т. 88. № 6. С. 912-933. (индексируется в *Scopus*).
4. Микова К.Д., Калинин В.Г., **Фасахов М.А.**, Шайдулина А.А., Ясинский С.В. Сезонные и многолетние изменения концентрации биогенных веществ в водохранилищах Камского каскада // Географический вестник. 2025. № 1(72). С. 86-98.
5. Калинин В.Г., Шайдулина А.А., **Фасахов М.А.**, Микова К.Д., Ясинский С.В., Скороход А.С. Особенности формирования водного режима водохранилищ Камского каскада // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2025. № 2. С. 80-92.

*Статьи в сборниках материалов конференций*

6. **Фасахов М.А.**, Микова К.Д., Шайдулина А.А., Калинин В.Г., Ясинский С.В. Изменения концентрации биогенных веществ за многолетний период в водохранилищах Камского каскада // VIII Всероссийская (национальная) научная конференция «Проблемы экологии Волжского бассейна 2023» («Волга-2023»), г. Нижний Новгород, 21-22 ноября 2023 г. Нижний Новгород, 2023. С. 1-6.
7. Калинин В.Г., Шайдулина А.А., **Фасахов М.А.** Внутригодовая изменчивость водного режима водохранилищ Камского каскада в многоводный 2019 год // VIII Всероссийская (национальная) научная конференция «Проблемы экологии Волжского бассейна 2023» («Волга-2023»), г. Нижний Новгород, 21-22 ноября 2023 г. Нижний Новгород, 2023. С. 1-6.
8. **Фасахов М.А.** Гидролого-геохимическая оценка стока р. Тулвы // Комплексные исследования водохранилищ и их водосборов: сборник научных трудов, посвященный 100-летию со дня рождения Ю.М. Матарзина. Пермь: ПГНИУ, 2024. С. 87-92.
9. Шайдулина А.А., **Фасахов М.А.**, Демина В.В. Водный режим Воткинского водохранилища на современном этапе // II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Цифровая география», Пермь, 25-28 сентября 2024 г. С. 277-280.

10. Шайдулина А.А., Петраш М.А., **Фасахов М.А.** Распределение приходных и расходных компонентов водного баланса и уровня режима Камского водохранилища с момента создания до 2024 г. // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов [Электронный ресурс]: тр. X Всероссийской науч.-практ. конф. с международным участием. Пермь, 2025. С. 246-251.

11. Кашутина Е.А., Ясинский С.В., Гришанцева Е.С., Расулова А.М., **Фасахов М.А.**, Шайдулина А.А. Распределение масс загрязняющих веществ в водохранилищах Верхней Волги в годы разной водности // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: тр. V Междунар. науч. конф. Барнаул: ИВЭП СО РАН, 2025. С. 145.

12. **Фасахов М.А.** Гидролого-геохимическая оценка стока загрязняющих веществ на водосборе реки белой // 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.

Подписано к печати \_\_\_\_\_ г. Формат 60\*84 1/16.  
Печ. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ №  
Отпечатано в типографии