

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Фасахова Михаила Александровича

«Формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах водохранилищ в бассейне реки Камы», представленную на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности 1.6.16 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Актуальность темы исследования. Диссертационная работа М.А. Фасахова посвящена одной из наиболее актуальных и сложных проблем современной гидрологии и гидрохимии – оценке формирования диффузного загрязнения водных объектов на водосборах крупных водохранилищ. Камский каскад, включающий Камское, Воткинское и Нижнекамское водохранилища, является ключевым элементом водохозяйственной системы Урала и Приволжья и одновременно испытывает значительную антропогенную нагрузку, связанную с сельскохозяйственным, промышленным, селитебным и транспортным освоением территории. В условиях роста антропогенной нагрузки и климатической изменчивости, проявляющейся в изменении водности, повторяемости засух и экстремальных осадков, проблема диффузного выноса биогенных элементов приобретает особую остроту. Существующие системы мониторинга в Российской Федерации ориентированы преимущественно на контроль за организованными сбросами и не обеспечивают количественной оценки рассредоточенного загрязнения. В этой связи разработка методических подходов к оценке и прогнозу диффузного загрязнения на основе ландшафтно-гидрологического моделирования представляется своевременной и практически значимой задачей.

Цель и задачи исследования. Целью работы является выявление закономерностей формирования гидролого-геохимических процессов на водосборах водохранилищ Камского каскада с применением ландшафтно-гидрологического моделирования. Для достижения поставленной цели автором последовательно решаются задачи, включающие картографирование ландшафтно-гидрологических условий водосборов, оценку функционирования водохранилищ в нормальных и экстремальных гидрологических условиях, анализ пространственно-временной изменчивости поступления загрязняющих веществ, расчёты диффузного загрязнения с использованием модели ЛГМ-2, сценарный прогноз до 2050 г. и разработку природоохранных рекомендаций. Поставленные задачи соответствуют цели и отражают комплексный характер исследования.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Объём работы составляет 164 страницы, включает 15 рисунков, 24 таблицы и 2 приложения. Библиографический список насчитывает 124 источника, из них 23 на иностранном языке.

Во *введении* обоснованы актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы защищаемые положения.

В *первой главе* выполнен обстоятельный обзор литературы по проблеме диффузного загрязнения водных объектов и моделей формирования гидролого-геохимических процессов на их водосборах. Проведен анализ используемой в различных литературных источниках терминологии и выбраны определения для точечных и неточечных (диффузных) источников загрязнения, а также приведена их классификация по происхождению (природные и антропогенные). Описаны основные виды хозяйственной деятельности, формирующие диффузное загрязнение, среди которых выделены сельское хозяйство, урбанизированные территории, транспорт, промышленность, добыча полезных ископаемых, рекреация. Детально охарактеризованы пути поступления загрязняющих

веществ с сельскохозяйственных угодий (эрозия, вынос удобрений, животноводство и пр.) и урбанизированных территорий (ливневые стоки, утечки канализации, смывы с дорог и промышленных площадок и пр.). Показана роль природных факторов (климата, рельефа, почвенного и растительного покрова) в формировании диффузного стока.

Выполнен обзор зарубежных моделей (SWAT, MODFLOW + MT3DMS, HSPF, MIKE SHE, SWMM) и отечественных разработок (ECOMAG, модель ИНЦ РАН, ЛГМ-2). Дана сравнительная характеристика моделей, их преимущества и ограничения. Обоснован выбор ландшафтно-гидрологической модели ЛГМ-2, разработанной в ИГ РАН, для оценки диффузного стока биогенных веществ. Приведены основные уравнения модели, учитывающие сток с различных типов угодий и антропогенную нагрузку на водосборной территории. Показано, что ЛГМ-2 наилучшим образом адаптирована к российским условиям, мозаичной структуре землепользования и позволяет учитывать прямую антропогенную нагрузку.

Во второй главе охарактеризованы природные и хозяйственные условия водосборов Камского, Воткинского и Нижнекамского водохранилищ, включая рельеф, почвенный и растительный покров, гидрографическую сеть. Приведена характеристика климата, а именно радиационный режим, циркуляция атмосферы, влияние Уральских гор, показаны среднемесячные температуры, количество осадков (от 500–550 мм на западе до 800 мм на северо-востоке), снежный покров (150–180 дней), глубина промерзания почвы и сезонные особенности весеннего снеготаяния, летне-осенней и зимней межени с учетом влияния климатических факторов на формирование стока.

Хозяйственная деятельность на водосборах определяет объёмы и состав как точечных (промышленные и коммунальные сбросы), так и диффузных (смыв с полей, урбанизированных территорий) источников загрязнения. В работе проанализированы основные виды хозяйственной деятельности на водосборах. Показано, что площадь сельхозугодий составляет 132 535 км² (36% территории), из них 79% сосредоточено на водосборе Нижнекамского водохранилища. Приведены данные по основным сельскохозяйственным культурам, по внесению удобрений и поголовью скота. Подробно рассмотрен промышленный комплекс, насчитывающий более 8000 предприятий, крупнейшие из которых «Уралкалий», «Соликамскбумпром», «КАМАЗ», «Нижнекамскнефтехим», «Лукойл-Пермнефтеоргсинтез» и др. На территории водосборного бассейна расположено 50 городов с населением более 50 тыс. человек, крупнейшие - Уфа, Пермь, Ижевск, Набережные Челны.

Отдельно рассмотрены исходные данные для оценки и прогноза диффузного загрязнения территории. Описаны источники и состав данных - гидрологические (ежедневные приток, сброс, уровни за 2002–2022 гг.), гидрохимические (20 веществ, 40 точек отбора, 2005–2022 гг. для Камского и Воткинского, 2003–2022 гг. для Нижнекамского водохранилищ), данные о сточных водах (АИС ГМВО, 2010–2021 гг.), картографические материалы (SRTM, OpenStreetMap, почвенная карта), статистические данные о хозяйственной деятельности (ЕМИСС, Росстат). Приведена схема расположения точек отбора проб и перечень определяемых химических элементов с указанием их ПДКр.х.

В третьей главе проанализировано функционирование водохранилищ Камского каскада в нормальных и экстремальных условиях. Приведены основные сведения о Камском, Воткинском и Нижнекамском водохранилищах, а именно история создания, напор, площадь водосбора, морфометрические характеристики (площадь зеркала, объём, полезный объём), характерные уровни (НПУ, УМО, ФПУ). Подробно описан гидрологический режим рек бассейна в период весеннего половодья, летне-осенней и

зимней межени. Показана роль водохранилищ в регулировании стока, где Камское – регулятор каскада, Воткинское – сопряжённое звено, Нижнекамское – транзитный режим.

Выполнен анализ многолетних изменений притока, сброса и уровня воды за 2002–2022 гг., где выделены многоводные (2017, 2019), средний по водности (2014) и маловодный (2021) годы. Показано, что приток в многоводный год на 26,5% больше, а в маловодный – на 25,4% меньше, чем в средний. Проанализировано внутригодовое распределение в фазах весеннего наполнения (апрель–май), летне-осенней стабилизации (июнь–октябрь) и зимней сработки (ноябрь–март). Отмечены особенности 2019 г., когда из-за дождевых паводков водосбросы открывались даже в ноябре. Приведены таблицы объёмов поступления и сброса воды в годы разной водности.

Четвёртая глава посвящена пространственно-временной изменчивости гидролого-геохимических характеристик Камского каскада. По данным АИС ГМВО проанализировано поступление биогенных веществ со сточными водами. Показано, что наибольшее количество азота общего (70%) и нитратов (42%) поступает в Камское водохранилище. Рассмотрены сезонные концентрации аммоний-иона, нитратов, нитритов, фосфатов, железа общего. Установлено, что максимальные концентрации аммония наблюдаются в весенний период, а фосфатов – в зимнюю сработку. Показано снижение концентраций аммония и железа по длине каскада от верховьев Камского до Нижнекамского водохранилища, что связано с удаленностью от источника загрязнения.

Выполнен расчёт масс загрязняющих веществ по 18 показателям за 2014, 2019, 2021 гг. Показано, что разница между массами веществ в годы разной водности достигает 60–70%, а по некоторым показателям – нескольких тысяч процентов. Отмечено, что в многоводный 2019 г. по ряду веществ (БПК₅, аммоний-ион) наблюдались минимальные массы, что связано с эффектом разбавления. Проанализировано распределение масс веществ между водохранилищами. Для большинства показателей оно близко к распределению объёмов воды, однако для аммоний-иона и нефтепродуктов выявлены значительные отклонения, обусловленные антропогенной нагрузкой.

Выполнена комплексная оценка качества воды по ИЗВ и УКИЗВ, которая показала, что по ИЗВ все водохранилища отнесены к III классу («умеренно загрязнённые»), а по УКИЗВ Камское и Воткинское – к категории «загрязнённые» (3а), Нижнекамское – «слабо загрязнённое» (2 класс). Отмечены устойчивые превышения ПДК_{р.х.} по железу, меди, ХПК и фенолам независимо от водности года.

В *пятой главе* представлен анализ гидролого-геохимических процессов на водосборах водохранилищ Камского каскада с применением модели ЛГМ-2. Изложены принципы модели ЛГМ-2, основанные на расчёте выноса биогенных веществ с различных типов угодий с учётом поверхностного, подповерхностного, подземного стока и стока наносов. Проведена адаптация модели к исследуемым водным объектам, включающая пространственную привязку статистических данных к границам водосборов, разработку ГИС-обеспечения (слои гидрографической сети, ландшафтной структуры, почвенного покрова, антропогенной нагрузки). Представлены источники и характеристики входных данных, а именно гидрологические ряды, концентрации биогенных веществ, данные о поголовье скота, внесении удобрений, численности населения. Приведены данные по апробации модели на пилотных водосборах (р. Кудьма, р. Линда), показавшая расхождение с наблюдениями 5–12%.

Представлены результаты расчётов выноса азота и фосфора по типам ландшафтов за 2014, 2019, 2021 гг. Установлено, что наибольший вклад в диффузную нагрузку вносят сельскохозяйственные угодья с уплотнённой почвой (58–72% азота и 57–72% фосфора). Для Нижнекамского водохранилища суммарный вклад пашни и уплотнённых почв достигает

85% по азоту и 80% по фосфору. Лесные ландшафты доминируют только на водосборе Камского водохранилища (53% азота и 57% фосфора). Выполнено сравнение вклада ландшафтного стока, контролируемых сбросов и прямой антропогенной нагрузки. Выделены три типа водохранилищ по характеру биогенной нагрузки: Камское – с преобладанием ландшафтной нагрузки (58–82%), Воткинское – смешанный тип с высокой динамичностью источников (доминирование промышленно-коммунальных сбросов в маловодные годы до 75%), Нижнекамское – аграрный тип с преобладанием диффузного стока (90–95%). Показано, что в маловодный 2021 г. суммарный вынос азота сократился на 16–34%, фосфора – на 34–49% по сравнению с 2014 г.

Разработаны прогнозные сценарии на период до 2050 г. с использованием климатических проекций СМIP6 (SSP2-4.5 и SSP5-8.5) и социально-экономических трендов (сокращение поголовья скота на 10–40%, стабилизация или сокращение площадей пашни). Прогнозные расчёты показали, что, несмотря на ожидаемый рост годового стока на 3–7%, масса диффузного выноса азота и фосфора снизится на 0,6–2,8% за счёт доминирования социально-экономических факторов над климатическими. Наибольшее снижение прогнозируется для Нижнекамского водохранилища (до –2,4% по азоту и –2,8% по фосфору). Исключение составляет Воткинское водохранилище, где ожидается небольшой рост выноса (до +1,3%) из-за локальных особенностей землепользования. Проведён факторный анализ, показавший, что вклад климатического фактора (+3...+5%) полностью нивелируется агрогенным (–5...–7%).

Предложен комплекс природоподобных (nature-based) технологий, дифференцированных по типам ландшафтов и источникам нагрузки. Для сельскохозяйственных ландшафтов (приоритет – Нижнекамское водохранилище) рекомендованы создание буферных прибрежных зон шириной 10–20 м, оптимизация норм и сроков внесения удобрений, внедрение точного земледелия и севооборотов с многолетними травами; для урбанизированных территорий (приоритет – Воткинское водохранилище) – «зелёная инфраструктура» (дождевые сады, биофильтры, проницаемые покрытия), модернизация ливневой канализации; для сельской местности – строительство локальных очистных сооружений и модернизация животноводческих ферм. Показан ожидаемый эффект от применения технологий, а именно снижение диффузного стока азота на 10–25%, фосфора – на 15–30%, а также улучшение класса качества воды.

В заключении сформулированы основные выводы:

1. Водный и гидрохимический режим водохранилищ Камского каскада определяется природными факторами и каскадным регулированием; качество воды по УКИЗВ варьирует от «слабо загрязнённых» до «загрязнённых».
2. Основными источниками поступления азота и фосфора являются лесные угодья (53% и 57%) на Камском водохранилище и сельскохозяйственные ландшафты (77% и 74%) на Нижнекамском.
3. Адаптированная ЛГМ-2 позволила выявить пространственную дифференциацию источников – преимущественно ландшафтная нагрузка на Камском, смешанный тип на Воткинском, аграрный – на Нижнекамском водохранилищах.
4. Сценарное прогнозирование показало снижение диффузного выноса биогенов к 2050 г. на 0,6–2,8% из-за доминирования социально-экономических факторов.
5. Для снижения диффузного загрязнения и повышения устойчивости водохранилищ к климатическим рискам предложен комплекс природоподобных мероприятий, соответствующих принципам устойчивого развития.

Научная новизна. Автором предложена методика учёта вклада хозяйственной деятельности регионов в диффузное загрязнение водосборов при ландшафтно-

гидрологическом моделировании. Впервые для водосборов Камского каскада выполнена комплексная оценка диффузного загрязнения с применением модели ЛГМ-2, адаптированной с учётом региональной специфики ландшафтной структуры, почвенно-геохимических условий и типов хозяйственного освоения. Выявлены закономерности усиления диффузного загрязнения в экстремальные по водности годы, обусловленные снижением разбавляющей способности водных объектов при сохранении или росте абсолютного выноса загрязняющих веществ. Разработан методический подход к прогнозу диффузного загрязнения на основе сценариев изменения климата и хозяйственной деятельности, интегрированный в модель ЛГМ-2. Полученные результаты обладают несомненной научной новизной и развивают теорию и практику гидролого-геохимических исследований.

Обоснованность и достоверность результатов. Достоверность результатов обеспечивается использованием большого объёма надёжных исходных данных - ежедневных гидрологических наблюдений за 2002–2022 гг., гидрохимических данных по 20 загрязняющим веществам в 40 точках отбора, сведений о сточных водах, картографических материалов SRTM, OpenStreetMap, почвенных карт и статистических данных ЕМИСС и Росстата. Верификация и валидация модели ЛГМ-2, выполненная ранее на водосборе р. Кудьмы, показала расхождение расчётных и фактических значений выноса минерального азота менее чем в 5%. В настоящей работе также проведена верификация расчётов путём сопоставления с официальными данными об объёмах и составе сточных вод и с фактическим содержанием загрязняющих веществ в воде Камских водохранилищ. Применение ГИС-технологий, статистических и сценарных методов соответствует современному уровню исследований. Основные положения работы прошли апробацию на российских и международных конференциях, опубликованы в 12 работах, из них 5 – в изданиях перечня ВАК, 2 – в изданиях, индексируемых Scopus.

Замечания и вопросы.

1. Модель ЛГМ-2, как справедливо отмечает автор, не учитывает внутриводоёмные процессы трансформации биогенов, такие как денитрификация в донных отложениях или потребление биогенов фитопланктоном. Однако хотелось бы увидеть хотя бы ориентировочную количественную оценку возможного влияния этого фактора на выводы о массе выноса веществ, особенно для Нижнекамского водохранилища, которое принимает на себя максимальную биогенную нагрузку.

2. В п. 3 Заключение говорится, что «адаптированная ЛГМ-2 позволяет достоверно оценивать пространственно-временную изменчивость диффузного загрязнения с учётом ландшафтной мозаичности, землепользования и антропогенной нагрузки». Как определялась достоверность оценки?

3. В разделе о сценарном прогнозировании упоминаются три сценария CMIP6 – SSP1-2.6, SSP2-4.5 и SSP5-8.5, однако фактические расчёты приведены только для SSP2-4.5 и SSP5-8.5 (см. табл. 24). Почему сценарий SSP1-2.6 исключён из итоговых оценок? Его включение позволило бы более полно охарактеризовать диапазон возможных изменений.

4. Вывод о том, что социально-экономические факторы «перевешивают» климатические и приводят к снижению диффузного выноса к 2050 г., является важным и нетривиальным. Однако он опирается на прогноз сокращения поголовья скота и стабилизации или сокращения площадей пашни. Насколько эти предпосылки согласуются с действующими региональными программами поддержки агропромышленного комплекса и возможными сценариями импортозамещения? Целесообразно было бы рассмотреть альтернативный сценарий «аграрного роста» хотя бы как расчетный эксперимент.

5. В работе встречается смешение терминов «сельскохозяйственные угодья» и «пашня» (например, при характеристике площадей и вкладов в вынос). Насколько это принципиально для расчётов? Было бы полезно чётко развести эти категории, поскольку вынос с пашни и сенокосов/пастбищ существенно различается.

Отмеченные замечания носят в основном уточняющий и дискуссионный характер и не снижают общей положительной оценки диссертационного исследования. Автореферат и опубликованные автором работы полностью отражают содержание диссертации.

Заключение. Диссертация М.А. Фасахова «Формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах водохранилищ в бассейне реки Камы» представляет собой законченное самостоятельное научное исследование, выполненное на актуальную тему, обладающее научной новизной, теоретической и практической значимостью. Работа соответствует паспорту ВАК по специальности 1.6.16 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия, и отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в «Положении о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. (с изменениями на 11.09.2021 г.). Автор диссертации, Фасахов Михаил Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата географических наук по специальности 1.6.16 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

Официальный оппонент:

заведующий лабораторией охраны вод,
старший научный сотрудник;
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных проблем Российской академии наук;
кандидат географических наук по специальности
25.00.36 – «Геоэкология»

16.09.2026

Козлова Мария Алексеевна

Место работы:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН)
Адрес: 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3.
Тел.: +7-499-135-54-56
e-mail: mblshok@mail.ru

Я, Козлова Мария Алексеевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

