На правах рукописи



НОВИКОВА ЛЮДМИЛА ВИКТОРОВНА

БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ МАРКЕРЫ И ИНДЕКСЫ ДЛЯ СИСТЕМНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВЛИЯНИЯ НЕФТЕДОБЫВАЮЩЕЙ ОТРАСЛИ НА ЭКОСИСТЕМЫ МАЛЫХ РЕК

1.5.15. Экология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата химических наук

Казань – 2026

Работа выполнена на кафедре прикладной экологии Института экологии, биотехнологии и природопользования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»

Научный руководитель: доктор биологических наук, профессор, **Степанова Надежда Юльевна**

Официальные оппоненты: **Кантор Евгений Абрамович**, доктор химических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», профессор кафедры «Физика»;

Галахина Наталия Евгеньевна, кандидат химических наук, Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», старший научный сотрудник, руководитель лаборатории гидрохимии и гидрогеологии

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина Российской академии наук, п. Борок.

Защита диссертации состоится «23» декабря 2026 г. в 11 часов 00 минут на заседании объединённого диссертационного совета 99.2.028.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, Зал заседаний Ученого Совета (А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте https:// https://www.kstu.ru/event.jsp?id=185973&id_cat=141

Автореферат разослан «____» октября 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 99.2.028.02 — Хабибрахманова Венера Равилевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Малые реки нефтедобывающих регионов испытывают длительное комплексное воздействие, обусловленное разведкой, добычей и транспортировкой углеводородного сырья. Поступление нефти и нефтепродуктов, сопутствующих пластовых вод, буровых растворов приводит к изменению химического состава поверхностных вод, донных отложений и биотических компонентов речных экосистем. Полициклические ароматические углеводороды и металлы характеризуются устойчивостью в окружающей среде, способностью к накоплению в донных отложениях и организмах гидробионтов, а также возможностью миграции по трофическим цепям. Отдельную проблему составляет накопленный экологический ущерб: нефтяное воздействие нередко проявляется в отложенной форме, когда загрязнители уже перераспределены между средами, а водный объект одновременно испытывает нагрузку от нескольких источников.

Традиционный экологический мониторинг, основанный преимущественно на стандартных гидрохимических показателях, не всегда позволяет оценить влияние нефтедобывающей деятельности и разграничить его с иными видами антропогенной нагрузки. Кроме того, раздельное изучение воды, донных отложений и биоты ограничивает возможность целостной оценки состояния речной экосистемы. Поэтому актуальными являются выявление регионально информативных гидрохимических, геохимических и биогеохимических маркеров, а также разработка интегральных алгоритмов мониторинга, объединяющих несколько компонентов речной экосистемы, что позволяет повысить информативность производственного и государственного экологического мониторинга и обосновать приоритетные направления природоохранных мероприятий.

Степень разработанности темы. Проблема воздействия нефтедобывающей и нефтехимической промышленности на водные объекты и другие компоненты окружающей среды широко отражена в трудах Е.А. Тафеевой, О.В. Гагариной, М.Б. Полозова, Т.К. Валеева с соавторами, V.S. Wilson, G.A. LeBlanc, Б.А. Бачурина, А.А. Борисова, Ю.А. Подавалова, Я.И. Лебедь-Шарлевич с соавторами и др. В исследованиях рассмотрены техногенная нагрузка на нефтедобывающие территории, миграция нефти, нефтепродуктов и сопутствующих загрязняющих веществ в водной среде, их экотоксикологические эффекты, накопление в донных отложениях и гидробионтах, а также методы экологического мониторинга и снижения нефтяного загрязнения. Методологические основы интегральной экологической оценки с использованием принципа совокупности доказательств (*WoE*) представлены в работах R.N. Hull и S. Swanson, S. Gottardo с соавторами, M. Piccardo с соавторами.

Вместе с тем отсутствуют апробированные интегральные WoE-подходы к оценке влияния нефтедобывающей деятельности в мониторинге малых рек, объединяющие маркерные показатели поверхностных вод, донных отложений и гидробионтов. Это определило направленность диссертации, посвященной обоснованию маркерных показателей влияния нефтедобывающей деятельности на малые реки и разработке интегрального индекса качества речных экосистем.

Целью работы является разработка комплексной системы биогеохимических маркеров и индексов для оценки влияния нефтедобывающей отрасли на абиотические и биотические компоненты экосистем малых рек на примере районов Республики Татарстан.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Обосновать выбор модельной и референтной рек, охарактеризовать химический состав поверхностных вод, выявить пространственную и сезонную изменчивость содержания приоритетных загрязняющих веществ и установить геохимические маркеры влияния нефтедобывающей отрасли на качество воды.

2. Оценить степень загрязнения донных отложений тяжелыми металлами и полициклическими ароматическими углеводородами с применением геохимических индексов для идентификации индикаторных загрязняющих веществ.

3. Проанализировать элементный состав зообентоса (двустворчатых моллюсков *Bivalvia sp.*) как биоиндикаторов качества водной среды и оценить накопление маркерных элементов в тканях моллюсков модельной и референтной рек.

4. Оценить биоаккумуляцию металлов и ПАУ в органах и тканях рыб различных трофических групп – бентофага леща *Abramis brama* и хищника судака *Sander lucioperca*.

5. Разработать интегральный индекс качества речных экосистем (РИК), объединяющий нормированные субиндексы качества абиотических и биотических компонентов.

6. Разработать иерархический алгоритм диагностики влияния нефтедобычи на водные объекты для оценки их экологического состояния.

Научная новизна.

1. Разработана трехступенчатая система диагностики влияния нефтедобывающей деятельности на воды малых рек, включающая: скрининговый хлоридный порог C_{Cl} = 30,1 мг/л; интегральный индекс загрязнения вод, основанный на взвешенных концентрациях приоритетных геохимических маркеров Cl^-, Mo, Sr; а также вероятностную классификацию проб поверхностных вод по признаку нефтедобывающего влияния. Выделенные маркеры и разработанная система обеспечивают разграничение участков, не подвергшихся нефтедобывающему влиянию и вод, трансформированных под влиянием нефтедобычи в условиях высокого природного геохимического фона.

2. Обосновано разграничение литогенной (Fe–Mn-ассоциация) и нефтяной (Pb–Zn–Cd-ассоциация) составляющих элементного состава донных отложений. Предложен индекс загрязнения донных отложений с трехуровневой шкалой интерпретации уровней загрязнения, обеспечивающей количественное разграничение зон фонового (< 0,851), умеренного (0,851-2,311) и выраженного (≥ 2,311) влияния объектов нефтедобычи.

3. Для двустворчатых моллюсков *Bivalvia sp.* выявлена группа аккумулируемых элементов Ba–Sr–Zn, отражающая длительное влияние нефтедобывающей деятельности в условиях многокомпонентного загрязнения. У рыб двух трофических групп – бентофага леща *Abramis brama* и хищника судака *Sander lucioperca* – накопление Cd в тканях определено как приоритетный биоаккумуляционный маркер нефтедобывающей деятельности (лещ: p <0,001, β = 6,44; судак: p <0,001, β = 5,18). Показано, что содержание Pb у леща является дополнительным маркером с учетом размерно-возрастных характеристик.

4. Разработан интегральный индекс качества речных экосистем (РИК) для комплексной оценки влияния нефтедобывающей деятельности на малые реки, объединяющий нормированные субиндексы состояния поверхностных вод, донных отложений и зообентоса, а также интегральную

оценку биоаккумуляции металлов у рыб. Индекс учитывает согласованный гидрохимический, седиментационный и биоиндикационный отклик и обеспечивает ранжирование участков водотоков по четырем уровням влияния (низкий, умеренный, повышенный и высокий).

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в развитии теоретико-методологических основ экологического мониторинга рек посредством обоснования принципов выбора и интеграции диагностических маркеров в системе «вода – донные отложения – биота», а также в расширении представлений о закономерностях аккумуляции приоритетных загрязняющих веществ в абиотических и биотических компонентах речных экосистем, испытывающих влияние нефтедобывающей деятельности.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

Разработан алгоритм комплексной диагностики влияния нефтедобывающей деятельности на малые реки с использованием предложенного индекса качества речных экосистем. Он может быть использован в системе производственного и государственного экологического мониторинга в районах нефтедобычи. Структура алгоритма может быть адаптирована для малых рек других нефтедобывающих регионов при условии верификации состава диагностических маркеров и калибровки пороговых значений индексов.

Сформирован массив данных о содержании приоритетных загрязняющих веществ в поверхностных водах, донных отложениях и биоте рек Шешмы и Мёши, который может быть использован в качестве региональной информационной основы для последующих мониторинговых исследований и сравнительной оценки состояния малых рек.

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению 05.03.06 «Экология и природопользование» в рамках дисциплины «Экологический мониторинг» (Справка о внедрении результатов диссертационной работы).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по теме «Особенности распределения и накопления металлов и ПАУ в абиотических и биотических компонентах водных экосистем с разным уровнем антропогенной нагрузки» (проект РФФИ № 18-35-00576 мол_а), молодежного гранта РГО «Снижение риска здоровью населения и повышение устойчивости развития нефтедобывающих регионов Республики Татарстан в условиях повышенной антропогенной нагрузки» (Договор № 64/2013-Н7), средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

Методология и методы исследования.

Методология исследования базируется на комплексной экосистемной оценке нефтедобывающего воздействия на малые реки и принципе совокупности доказательств (WoE). Сравнительный подход реализован посредством сопоставления состояния р. Шешмы, испытывающей влияние нефтедобывающей деятельности, с р. Мёшей, принятой в качестве референтного объекта вследствие сходства природно-климатических и гидрологических условий при отсутствии нефтедобычи в её бассейне.

Работа включала выбор объектов и участков наблюдений, отбор проб воды, донных отложений, зообентоса и рыб, определение содержания загрязняющих веществ, расчет

экологических индексов, выявление маркерных показателей влияния нефтедобывающей деятельности и построение интегрального индекса качества речной экосистемы. В качестве биоиндикаторов исследовали двустворчатых моллюсков *Bivalvia sp.*, леща *Abramis brama* и судака *Sander lucioperca*.

В работе использованы полевые, лабораторные, химико-аналитические, расчетно-индексные, статистические и геоинформационные методы. Содержание металлов определяли методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре ICPE-9000 (Shimadzu, Япония); содержание полициклических ароматических углеводородов – методом высокоэффективной жидкостной хроматографии на хроматографе Flexar (PerkinElmer, США). Анализ воды, донных отложений и биоты выполняли с применением аттестованных методик. Гранулометрический состав донных отложений определяли методом лазерной дифракции на лазерном анализаторе размеров частиц Microtrac S3500 (Microtrac Inc., США).

Оценку состояния компонентов речной экосистемы осуществляли с использованием индексов загрязнения и экологического риска PLI, PER, EF, I_{geo}, коэффициента опасности HQ, а также показателей биоаккумуляции BAF и MPI. Для обработки данных применяли параметрические и непараметрические методы статистики, многомерный дисперсионный анализ PERMANOVA, анализ главных компонент PCA, линейные смешанные модели LMM для натуральных логарифмов концентраций металлов, иерархическую кластеризацию и метод k-средних. Прогностические модели степени загрязнения и отнесения участков к классам влияния разрабатывали методами логистической регрессии, дискриминантного анализа и деревьев решений. Весовые коэффициенты субиндексов интегрального речного индекса качества определяли с использованием PCA; их устойчивость оценивали последовательным исключением отдельных пространственных единиц. Статистическую обработку и моделирование выполняли в программной среде R версии 4.3.3, картографическую визуализацию – в ГИС QGIS версии 3.4.15.

Объект исследования – водные экосистемы рек Мёша и Шешма (Республика Татарстан): поверхностные воды, донные отложения, зообентос (двустворчатые моллюски *Bivalvia sp.*), ткани и органы рыб двух трофических уровней (лещ *Abramis brama*, судак *Sander lucioperca*).

Предмет исследования – содержание и распределение нефтепродуктов, полициклических ароматических углеводородов и металлов в абиотических и биотических компонентах водных экосистем.

Положения, выносимые на защиту:

1. Геохимическими маркерами влияния нефтедобывающей деятельности на качество поверхностных вод малых рек (на примере р. Шешма, Республика Татарстан), являются Cl^-, Mo, Sr, Cd и Pb. Трехступенчатая система диагностики, включающая скрининговый хлоридный порог (C_{Cl} = 30,1 мг/л), определенный с использованием алгоритма дерева решений; интегральный индекс загрязнения вод; вероятностную классификацию на основе бинарной логистической регрессии, позволяет надежно идентифицировать водные объекты, испытывающие влияние объектов нефтедобычи.

2. Донные отложения реки, подверженной длительному влиянию нефтедобычи (р. Шешма), характеризуются специфической техногенной геохимической ассоциацией Pb–Zn–Cd в сочетании с

высоким содержанием нефтепродуктов и высокомолекулярных ПАУ. Индекс загрязнения донных отложений, рассчитанный на основе нормированных отклонений шести маркеров – нефтепродукты, сумма ПАУ, Cd, Cu, Pb, Zn – обеспечивает выделение зон влияния нефтедобывающего комплекса.

3. В тканях двустворчатых моллюсков *Bivalvia sp.* установлен специфический элементный комплекс Ba–Sr–Zn, ассоциированный с влиянием нефтедобычи. Приоритетным биоаккумуляционным индикатором загрязнения является Cd в тканях леща *Abramis brama* и судака *Sander lucioperca*. Содержание Pb у леща является дополнительным маркером с учетом размерно-возрастных характеристик.

4. Разработан алгоритм комплексной оценки нефтедобывающего влияния на малые речные экосистемы, включающий выявление приоритетных геохимических и биогеохимических маркеров. Предложенный интегральный индекс качества речных экосистем (РИК), основанный на принципе совокупности доказательств и объединяющий нормированные субиндексы загрязнения воды, донных отложений и бентоса с соответствующими весовыми коэффициентами и мультипликативным ихтиологическим корректором K_F, обеспечивает интегральную оценку выраженности нефтедобывающего влияния на речную экосистему.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность результатов исследования обеспечивается репрезентативностью и воспроизводимостью экспериментального материала, применением нормативных методик ПНД Ф и методических указаний на всех этапах отбора, консервации, подготовки и анализа проб, а также использованием современного лабораторного оборудования, обеспечивающего высокую чувствительность, точность и воспроизводимость измерений. Качество полученных данных контролировалось в соответствии с требованиями применяемых методик, включая оценку точности результатов измерений. Обоснованность выявленных закономерностей подтверждена применением методов статистической обработки и многомерного анализа данных, соответствующих задачам исследования, а также согласованностью результатов, полученных для различных компонентов речных экосистем.

Апробация результатов. Материалы диссертации прошли апробацию на Всероссийской конференции молодых ученых «Экология: теория и практика» (Екатеринбург, 2013 г.), Международной конференции «Окружающая среда и устойчивое развитие регионов: экологические вызовы XXI века» (Казань, 2017 г.), Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (Москва, 2018 г.; 2019 г.), Международной научно-практической конференции «Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование» (Москва, 2018 г.), Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем» (Киров, 2019 г.), III Международной научно-практической конференции «Географическое пространство: Сбалансированное развитие природы и общества» (Челябинск, 2023 г.), VII Международной научно-практической конференции «Современное состояние водных биоресуров и аквакультуры» (Новосибирск, 2024 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликована 21 научная работа, из них 4 статьи в рецензируемых научных журнала, рекомендованных ВАК Минобрнауки России по

специальности, 3 статьи в других рецензируемых журналах, включая индексируемые в базах данных Web of Science и Scopus, 14 работ в журналах, сборниках и материалах Международных и Всероссийских научных конференций.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.5.15 «Экология» (отрасль науки – химические) по п. 2 в части: «Комплексная оценка влияния промышленных объектов нефтегазовой отрасли на природные экосистемы. Принципы и механизмы системного экологического мониторинга».

Объем и структура диссертации. Диссертация изложена на 214 страницах, содержит 39 рисунков и 28 таблиц, состоит из введения, 3 глав, заключения, списка цитируемой литературы, насчитывающего 431 ссылку на работы отечественных и зарубежных авторов, и 7 приложений.

Личный вклад автора. Автор лично участвовал в планировании и проведении полевых экспедиционных работ, отборе и первичной обработке проб на всех исследуемых водотоках; подготовке публикаций; самостоятельно выполнил статистический анализ данных, разработал авторские индексы ($ИЗ_{В}$, $ИЗ_{ДО}$, $ИЗ_{ЗБ}$, РИК) и классификационный алгоритм. Соавтором публикаций является научный руководитель д.б.н., Степанова Н.Ю.

Благодарности. Автор приносит благодарность научному руководителю, д.б.н., профессору Н.Ю. Степановой за научное руководство и помощь в подготовке диссертации к защите, коллегам: д.х.н., профессору Латыповой В.З., к.б.н., доценту Ахметзяновой Л.Г., инженеру Гайфутдиновой Н.Р. за помощь в проведении исследований и ценные рекомендации; к.ф.-м.н. Никоненковой Т.В. за помощь в реализации процедур рекурсивного исключения признаков в R и применении регрессии PLS при анализе взаимосвязей между металлами в тканях рыб и абиотическими компонентами; а также соавторам публикаций и коллегам по выполнению грантовых исследований – за совместную работу, обсуждение результатов и содействие в подготовке научных материалов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы работы и степень научной проработанности проблемы диагностики нефтяного влияния на малые реки нефтедобывающих регионов. Приводятся цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, а также изложены методологические подходы и основные методы исследования.

В первой главе приведен обзор литературы по теме исследования. Рассмотрены миграция, трансформация и накопление нефти, нефтепродуктов, полициклических ароматических углеводородов и химических элементов в воде, донных отложениях и гидробионтах, а также их роль в формировании долговременного экологического риска для речных экосистем. Проанализированы критерии и индексы оценки состояния поверхностных вод, донных отложений и биоты, возможности использования гидробионтов в качестве индикаторов состояния водных объектов, а также методологические подходы к комплексной оценке нефтепромыслового воздействия.

Во второй главе описаны объекты и материалы исследования, структура выборки и основные подходы к обработке данных. Критериями выбора рек служили наличие задокументированной нефтедобычи в водосборе, отсутствие существенного регулирования стока, ограниченность прочих антропогенных источников загрязнения и сопоставимость гидрологических,

морфометрических и геохимических характеристик с референтной рекой. В качестве модельного объекта выбрана река Шешма, расположенная в нефтедобывающем районе и характеризующаяся длительной эксплуатацией месторождений и развитой промысловой инфраструктурой, что обусловливает сочетание хронического нефтяного влияния и накопленного экологического ущерба. В качестве референтного водного объекта использована р. Мёша, сопоставимая с р. Шешмой по морфометрическим и гидрологическим характеристикам, но не испытывающая прямого нефтепромыслового влияния (рисунок 1).

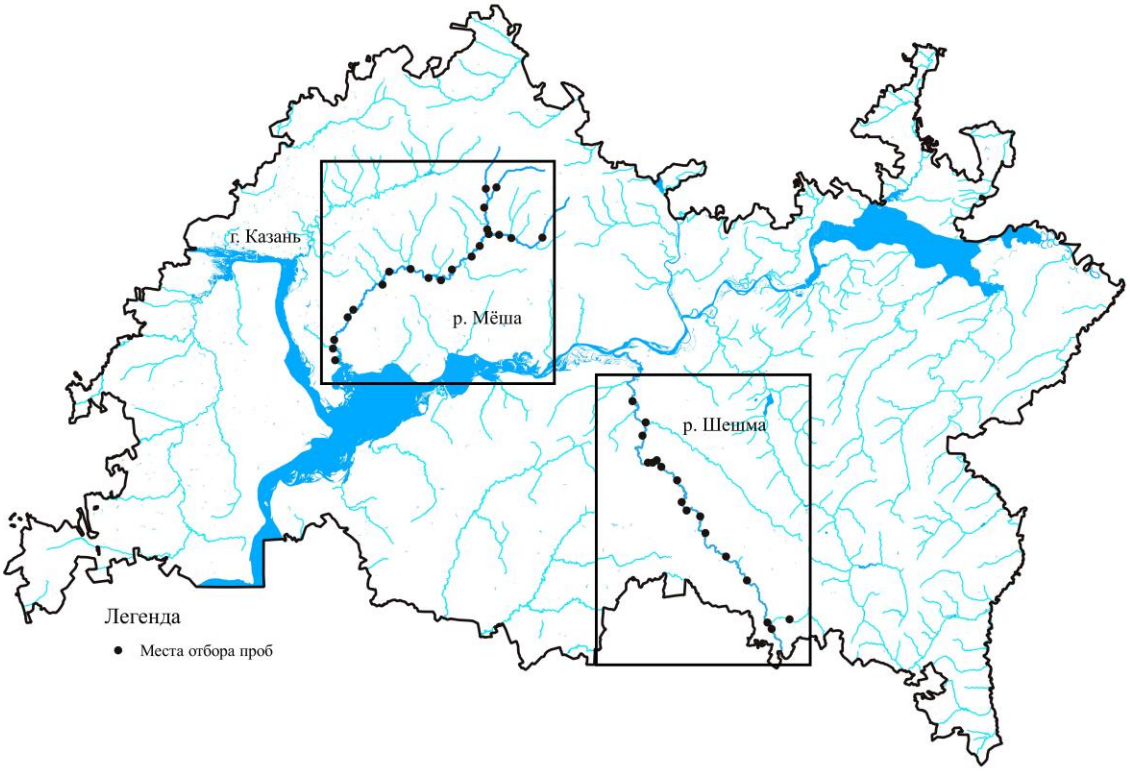


Рисунок 1 – Объекты исследования

В результате отбора сформирован репрезентативный массив данных, включающий 232 пробы поверхностных вод по 26 показателям, 52 пробы донных отложений по 33 показателям, 30 проб двустворчатых моллюсков *Bivalvia sp.* по 14 показателям, а также 63 экземпляра леща (*Abramis brama*) и 41 экземпляр судака (*Sander lucioperca*) с определением 14 элементов в трёх органах (жабры, печень, мышцы) у каждого вида. В главе приводится общая схема организации исследования, отображающая последовательность этапов отбора проб, пробоподготовки, химико-аналитических измерений, обработки данных и расчёта индикаторных и интегральных показателей качества речных экосистем.

В третьей главе приведены основные результаты работы и их обсуждение.

Оценка загрязненности воды. По результатам наблюдений значимые отличия ($p < 0,05$ по критерию Манна-Уитни) между реками отмечены по ряду показателей (таблицы 1 и 2). Так в р. Мёше статистически значимо выше содержание ионов аммония и нитрит-ионов. Содержание гидрокарбонат-, нитрат-ионов, сухого остатка, минерализации, хлоридов, СПАВ, ХПК Ba, Cd, Cr,

Cu, Mo, Sr, Zn и Pb и взвешенных веществ напротив выше в р. Шешме. Содержание нефтепродуктов (НП) не превышает установленные нормативы в воде обеих рек. В таких условиях НП перестают быть надёжным индикатором влияния нефтяной отрасли и должны рассматриваться исключительно как показатель общей антропогенной нагрузки.

Таблица 1 – Содержание отдельных показателей в поверхностных водах, мг/л

Показатели	$ПДК_{рх}$	р. Шешма		р. Мёша	
Взвешенные вещества		**120±18,2**[1]	**164**	20,9±1,97	12,1
Сухой остаток		**605±16,8**	**622**	538±21,7	534
Минерализация		**758±23,4**	**772**	616±24,7	670
Гидрокарбонат-ион		**364±12,4**	**370**	278±10,6	300
Ионы аммония	0,5	0,15±0,03	0,03	**0,14±0,02**	**0,09**
Нитрат-ион	40	**8,77±0,69**	**9,10**	**5,64±0,32**	**5,58**
Нитрит-ион	0,08	0,06±0,009	0,04	**0,08±0,008**	**0,06**
Хлориды	300	**63,5±2,51**	**68,8**	**11,3±0,36**	**11,0**
Нефтепродукты	0,05	0,04±0,005	0,02	0,03±0,003	0,02
СПАВ	0,1	**0,01±0,002**	**0,01**	0,003±0,0005	0
ХПК		**19,2±1,90**	**19,2**	13,2±0,67	11,8

Таблица 2 – Содержание отдельных элементов в поверхностных водах, мкг/л

Элементы	$ПДК_{рх}$	р. Шешма		р. Мёша	
Ba	740	**68,2±0,47**[1]	**67,8**	54,6±0,75	54,9
Cd	5	**1,29±0,30**	**0**	0,02±0,008	0
Cr	70	**0,80±0,15**	**0,45**	0,70±0,22	0
Cu	1	**6,83±0,90**	**3,20**	5,56±0,91	1,50
Mn	10	33,1±2,30	26,9	**58,3±3,66**	**54,0**
Mo	1	**4,84±0,09**	**4,91**	3,87±0,15	3,76
Pb	6	**6,11±1,19**	**0**	0,34±0,11	0
Sr	400	**1273±27,5**	**1267**	1099±69,8	1032
Zn	10	**14,1±1,47**	**10,3**	11,5±1,54	1,42

Примечание: данные представлены в виде M±m и Me, где M – среднее арифметическое, m – ошибка среднего арифметического (стандартная ошибка), Me – медиана. [1] *жирным выделены статистически значимо различающиеся показатели ($p < 0,05$)*

Анализ показал, что гидрохимический состав существенно отличается как между реками, так и между сезонами, при этом сезонность вносит сопоставимый с межречными различиями вклад в вариабельность показателей (PERMANOVA; $p < 0,001$), что делает корректным сравнение качества воды только при отборе проб в один и тот же сезон. Выделены три устойчивые группы проб (рисунок 2): условно чистые воды р. Мёши, умеренно загрязнённые воды, а также 3 кластер сильно загрязнённых вод, представленный исключительно пробами р. Шешмы.

Для воды р. Мёши характерна статистическая однородность и высокая доля условно чистых проб (43 %), тогда как для р. Шешмы отмечена высокая вариабельность и доля сильно загрязнённых проб 14,5 %, что указывает на наличие локальных техногенных источников. В результате обобщения многомерных данных установлен минимальный набор наиболее информативных индикаторов нефтепромыслового влияния (Cl^-, Cd, Pb, Mo, Sr), обеспечивающих чёткое разделение вод.

Для диагностики нефтяного загрязнения разнородные гидрохимические показатели интегрировали в единую систему, в виде алгоритма, включающего нормативный, мультимаркерный и вероятностный уровни анализа. На первой ступени в качестве скринингового маркера

используется хлорид-ион: порог 30,1 мг/л надёжно отделяет воды с естественной вариабельностью (в р. Мёше хлориды не превышают 26,9 мг/л) от участков р. Шешмы, находящихся под влиянием нефтедобычи, где минимальная зафиксированная концентрация составляет 39,0 мг/л; превышение порога служит сигналом перехода ко второй ступени.

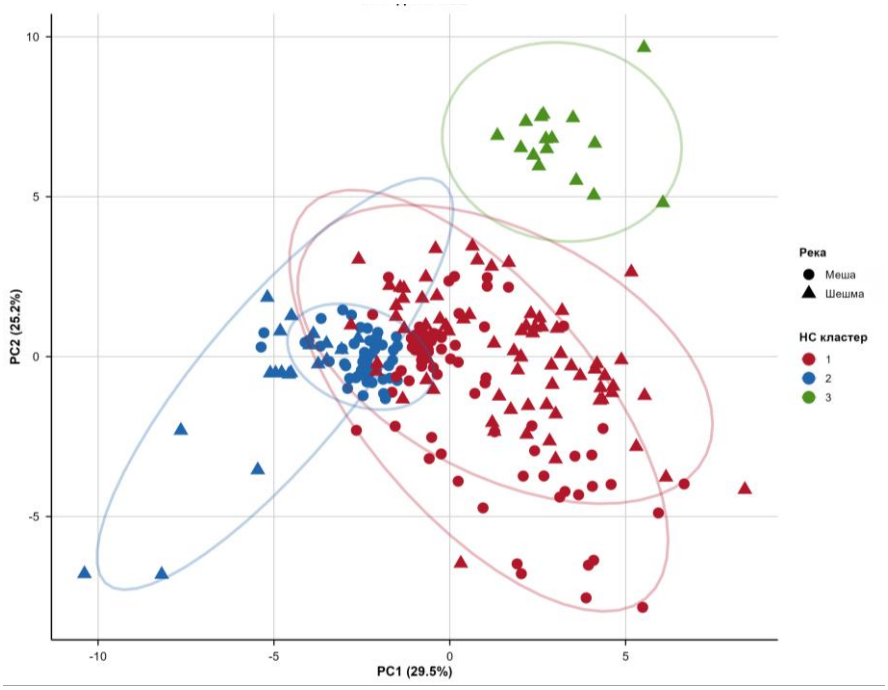


Рисунок 2 – Иерархическая кластеризация методом Ward.D2 (HC)

На второй ступени рассчитывается безразмерный взвешенный индекс загрязнения вод ($ИЗ_в$) основанный на отношении «факт/фон» для трех маркеров (Cl^-, Mo, Sr):

$$ИЗ_В = w_{Cl^-} \cdot \frac{Cl^-}{Cl^-_{ref}} + w_{Mo} \cdot \frac{Mo}{Mo_{ref}} + w_{Sr} \cdot \frac{Sr}{Sr_{ref}},$$

где Cl^-, Mo, Sr – фактические концентрации маркеров в пробе,

Cl^-_{ref}, Mo_{ref}, Sr_{ref} – референсные значения соответствующих показателей, принятые равными медианным концентрациям в контрольной реке (р. Мёша),

w_{Cl^-}, w_{Mo}, w_{Sr} – весовые коэффициенты.

Индикаторные элементы Cd и Pb были исключены из дальнейшего анализа как показатели с неустойчивыми статистическими характеристиками. Среднее значение индекса $ИЗ_В = 0{,}2765 \cdot \frac{C_{Cl}}{13{,}471} + 0{,}3681 \cdot \frac{C_{Mo}}{3{,}755} + 0{,}3554 \cdot \frac{C_{Sr}}{1032{,}16}$ для референтной реки составляет 1,04, для модельной 2,24.

При превышении порогового значения $ИЗ_в$, составляющего 1,3, активируется третья ступень – вероятностная оценка нефтяного влияния с использованием уравнения бинарной логистической регрессии, продемонстрировавшей высокую способность различать фоновые и загрязнённые воды:

$$P(\text{нефтяное воздействие}) = \frac{1}{1+e^{-(\beta_0+\beta_1 C_{Cl}+\beta_2 C_{Mo}+\beta_3 C_{Sr})}},$$

где ßi – коэффициент логистической регрессии, отражающий вклад соответствующего предиктора в вероятность нефтедобывающего воздействия при прочих равных условиях. Коэффициенты для

изучаемой реки получены методом максимального правдоподобия и равны: $\beta_0 = -10{,}299$, $\beta_1 = 0{,}1359$, $\beta_2 = 2{,}0947$ и $\beta_3 = -0{,}0028$. Числовые значения β подлежат повторной калибровке для каждой новой речной системы. При пороговом значении $P > 0{,}5$ проба классифицируется как принадлежащая зоне вероятного влияния нефтедобывающей деятельности.

Оценка качества донных отложений. Донные отложения (ДО) обладают более стабильным составом, чем вода, и выступают долговременным депо загрязняющих веществ, позволяя одновременно характеризовать природный геохимический фон и антропогенную нагрузку. В обоих водотоках преобладают пелитовые и мелкоалевритовые фракции, однако доля песчаных фракций выше в р. Мёше, тогда как в ДО р. Шешмы содержание органического углерода примерно в 6 раз больше, что указывает на более высокую сорбционную способность.

Содержание НП в ДО варьирует в широких пределах, средние значения в р. Шешме выше, чем в р. Мёше; превышения нормативов зарегистрированы только в пробах с высоким содержанием мелкодисперсной (пелитовой) фракции и низким содержанием органических веществ. Суммарное содержание ПАУ в целом сопоставимо между реками, но для ДО р. Шешмы характерно кратное (в 3,8-4,3 раза) увеличение концентраций бенз[a]пирена и бенз[b]флуорантена, а также более высокий вклад высокомолекулярных ПАУ, содержание которых в среднем в р. Шешме составляет 8,80 мкг/кг и 3,06 мкг/кг в р. Мёше, и повышенный коэффициент опасности $К_{ПАУ}$, медиана которого в Шешме составляет 6,32 против 1,13 для контрольной реки, что свидетельствует о большей потенциальной токсичности донных отложений р.Шешмы для водной биоты.

Элементный анализ выявил статистически значимые различия ($p < 0{,}05$) между реками по содержанию Zn, Cd и Pb во всех типах ДО (таблица 3). В контрольной реке содержание Cd и Pb чаще ниже порога обнаружения, тогда как в модельной реке эти элементы фиксируются регулярно, что отражает более выраженное техногенное воздействие. Многомерный анализ PCA показал, что для референтной реки характерен однородный литогенный фон с Fe-ассоциацией, в то время как в исследуемой реке на этот фон накладывается антропогенная Zn–Cd–Pb-ассоциация, позволяющая рассматривать эти элементы как диагностические маркеры влияния нефтедобычи.

Таблица 3 – Содержание отдельных элементов в зависимости от типа грунта, мг/кг

Элемент		Cd	Pb	Zn
Пески	р. Шешма	0,52 ± 0,08	49,9 ± 7,06	36,6 ± 4,42
	р. Мёша	<0,05	< 0,50	23,0 ± 3,91
Илы	р. Шешма	0,42 ± 0,03	66,8 ± 5,53	52,0 ± 5,69
	р. Мёша	< 0,05	< 0,50	25,5 ± 1,23

Корректировка концентраций металлов к условно стандартному составу донных отложений продемонстрировала, что вариации Cr и Ni в основном обусловлены различиями гранулометрического состава, тогда как для Zn, Pb и Cd значительная доля вариаций не объясняется литогенными факторами. Кластерный анализ позволил выделить три устойчивых типа ДО (рисунок 3): первый кластер, представленный пробами р. Шешмы, характеризуется максимальными содержаниями Pb, Zn, НП и суммы ПАУ, кластер 3, состоящий из проб отобранных в контрольной реке включает пробы с более низким содержанием НП и ПАУ с минимальными концентрациями Pb

и Zn при сохранении относительно повышенного содержания Cr и Ni; Cd на уровне предела обнаружения.

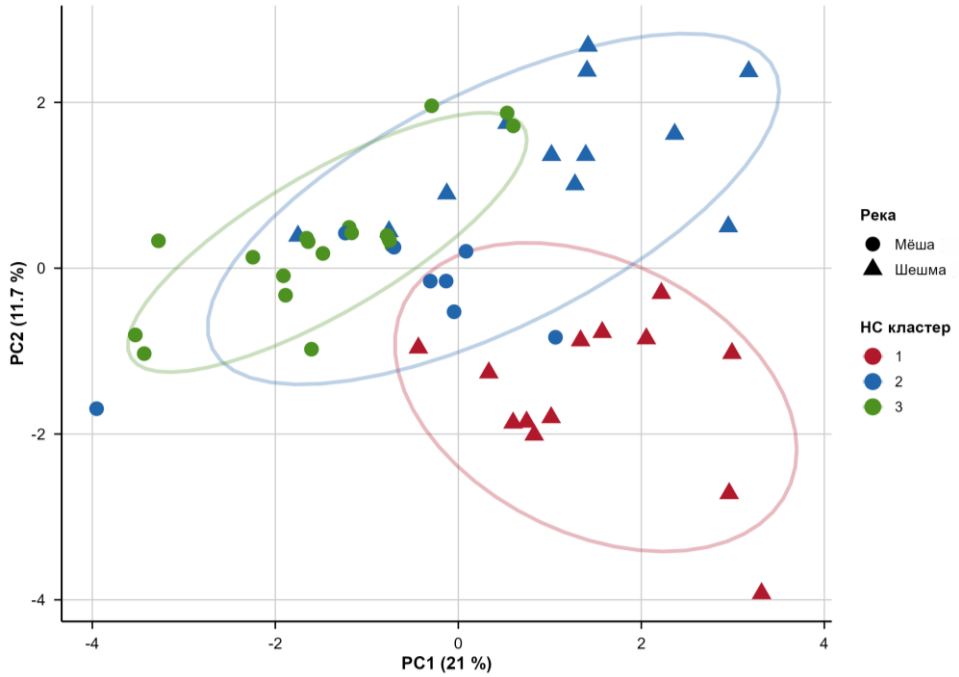


Рисунок 3 – Иерархическая кластеризация донных отложений (метод Ward.D2)

В качестве индикаторов нефтедобывающего влияния для ДО обоснован комплекс «НП + сумма ПАУ + Cd + Cu + Pb + Zn». Предложен интегральный индекс $ИЗ_{ДО}$, рассчитываемый как среднее нормированных превышений по перечисленным показателям, приведенным к стандартному ДО.

$$ИЗ_{ДО} = \frac{1}{6}\sum_{i=1}^{6} max\left(0, \frac{X_i - Med_{Mesha,i}}{SD_{Mesha,i}}\right),$$

где X_i – содержание i-го показателя в данной пробе Шешмы, мг/кг,

$Med_{Mesha,i}$ – медиана i-го показателя по р. Мёша,

$SD_{Mesha,i}$ – стандартное отклонение i-го показателя по р. Мёше,

функция max(0,·) обнуляет отрицательные отклонения, чтобы индекс учитывал только превышения над фоном.

Для контрольной реки величины $ИЗ_{ДО}$ близки к нулю, тогда как в модельной индекс позволяет статистически обоснованно выделять участки с умеренным и выраженным воздействием нефтедобывающей деятельности, при этом нижний порог (0,85) равный 90-му перцентилю распределения индекса по пробам р. Мёша, соответствует верхней границе естественной фоновой вариабельности, а верхний (2,31) – зонам значимого нефтяного влияния и определён как сумма медианы и 1,5 межквартильных размаха по распределению индекса в р. Шешма. $ИЗ_{ДО}$ имеет региональный характер и требует перекалибровки фоновых параметров и пороговых значений при применении в других регионах.

Элементный состав двустворчатых моллюсков (*Bivalvia sp.*) и тканей рыб – леща (*Abramis brama*) и судака (*Sander lucioperca*). Для оценки биологического отклика на выявленные

градиенты загрязнения был проведен элементный анализ донных беспозвоночных – двустворчатых моллюсков *Bivalvia sp.*, являющиеся биоиндикаторами качества придонной среды и характеризующие длительное воздействие загрязняющих веществ. При сравнении отдельных элементов в мягких тканях достоверные различия между реками выявлены только по Sr ($p = 0,04$). Многомерный анализ показал, что для р. Мёши характерна ассоциация Al–Ni–V, а для р. Шешмы – специфичный комплекс Ba–Sr–Zn, ассоциированный с нефтедобывающим влиянием (рисунок 4).

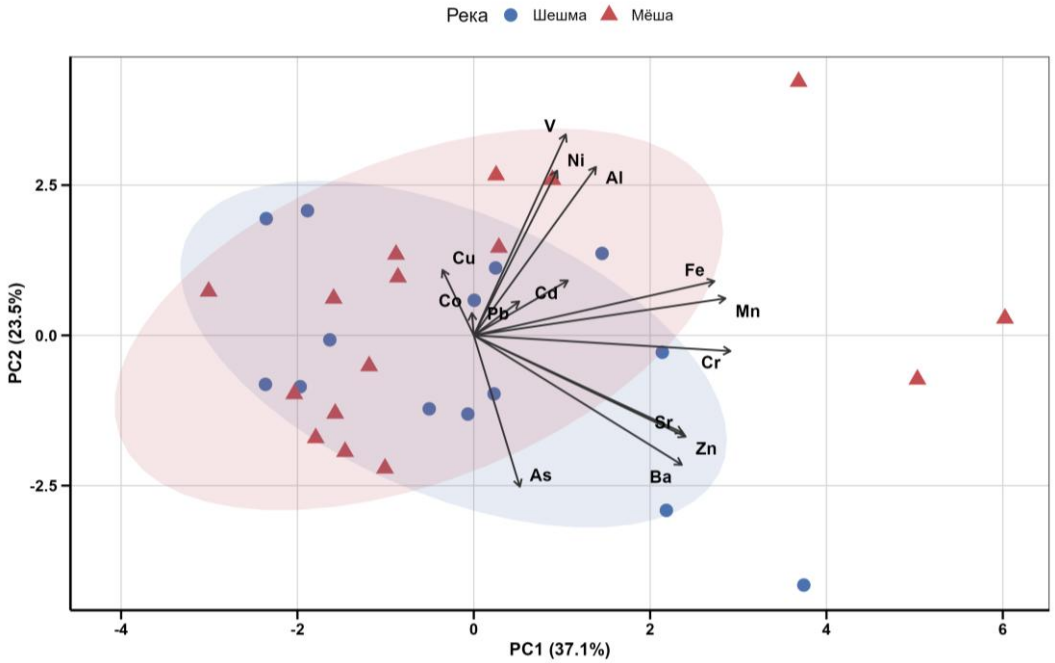


Рисунок 4 – Биплот первых двух главных компонент PCA для двустворчатых моллюсков *Bivalvia sp.*

Для количественной оценки степени нефтепромыслового влияния, зарегистрированного в двустворчатых моллюсках, был рассчитан интегральный индекс загрязнения зообентоса ($ИЗ_{ЗБ}$), представляющий собой среднее арифметическое отношений средних концентраций Ba, Sr и Zn в моллюсках р. Шешмы к соответствующим значениям условно контрольной реки. Значение $ИЗ_{ЗБ}$ – 1,288 (Ba – 1,378; Sr – 1,411; Zn – 1,074) свидетельствует, что суммарное накопление маркерных элементов в моллюсках модельной реки в среднем на 28,8% выше по сравнению с контрольной рекой.

Биоаккумуляция металлов в тканях промысловых видов рыб (*Abramis brama*, *Sander lucioperca*) показала выраженный межречной контраст и подтвердила более высокую техногенную нагрузку в бассейне р. Шешмы. Индекс загрязнения металлами (MPI), показывающий валовое накопление металлов в жизненно-важных органах, для мышечной ткани лещей в целом сопоставим между реками и составляет 2,07 в Шешме и 1,99 в Мёше. В печени различия выражены гораздо сильнее: в районах с интенсивной нефтедобычей MPI превышает показатели сельскохозяйственного бассейна более чем в два раза и достигает 13,1.

Согласно критерию Манна-Уитни, содержание ряда элементов в тканях леща статистически значимо различается между реками ($p < 0,05$): в мышцах – Al, Fe, Mn, Cd, Cr, Ni и Pb; в печени – Al, As, Fe, Cd, Cr, Ni, Sr, Zn и Pb; в жабрах – Al, As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Ni и Zn. Для тканей судака

статистически значимые межречные различия выявлены по содержанию Al, As, Cd, Cu и Mn в печени, Al, As, Cd, Fe и Mn в жабрах, а также Al, As, Fe, Cd, Mn, Ni и Pb в мышечной ткани.

В целом и лещ, и судак из модельной реки интенсивнее аккумулируют элементы, связанные с нефтедобывающей деятельностью, а именно для леща это прежде всего Cd во всех тканях, Pb в мышцах и печени, Ni в печени, Cr в печени и жабрах. Для судака – Pb в мышцах и Cd в мышцах, печени и жабрах. Cd в мышечной ткани леща и судака из контрольной реки практически не фиксируется, тогда как в исследуемой реке среднее содержание Cd в мышцах леща составляет 0,47 ± 0,04 мг/кг, судака – 0,78 ± 0,05 мг/кг (таблица 4).

Таблица 4 – Содержание отдельных элементов в тканях и органах (мг/кг с.м.)

		Бентофаг		Хищник	
		р. Мёша	р. Шешма	р. Мёша	р. Шешма
Мышцы	Cr	0,40±0,08[b]	1,16±0,21[a]	0,72±0,16	1,66±0,61
	Cd	нпо[b,2]	0,47±0,04[a,d]	нпо[d]	0,78±0,05[b,c]
	Cu	1,09±0,12[c]	1,44±0,13[d]	0,44±0,03[a]	0,49±0,15[b]
	Ni	0,29±0,06[b]	0,11±0,03[a]	0,28±0,09	0,07±0,03
	Pb	0,20±0,13[b]	2,68±0,54[a,d]	0,14±0,04[d]	0,41±0,06[b,c]
Печень	Cr	0,31±0,06[b,c]	4,46±0,60[a]	1,32±0,34[a]	2,33±0,73
	Cd	0,31±0,06[b,c]	0,81±0,12[a]	нпо[a,d]	0,81±0,07[c]
	Cu	30,66±4,38[c]	21,06±2,55[d]	1,88±0,55[a,d]	6,04±1,19[b,c]
	Ni	0,32±0,06[b]	1,40±0,35[a,d]	0,16±0,11	0,24±0,14[b]
	Pb	3,19±2,81[b]	11,16±2,11[a,d]	2,29±0,94[d]	0,62±0,18[b,c]
Жабры	Cr	0,41±0,03 [b,c]	3,62±0,97[a]	0,85±0,20[a]	1,71±0,57
	Cd	0,24±0,12 [b]	1,78±0,08 [a,d]	нпо[d]	0,57±0,04[b,c]
	Cu	2,86±0,19 [b,c]	1,33±0,13 [a]	1,48±0,08[a]	1,09±0,20
	Ni	0,26±0,06[b,c]	0,02±0,01[a]	0,04±0,02[a]	0,04±0,02
	Pb	0,24±0,09	0,46±0,14	0,10±0,06	0,29±0,09

[1] Достоверные отличия между видами и реками выделены буквами:[a] – лещ р. Мёша; [b] – лещ р. Шешма; [c] – судак р. Мёша; [d] – судак р. Шешма [2] ниже порога обнаружения

Наибольшие концентрации Cr отмечены в печени и жабрах рыб из р. Шешмы; у леща разница между реками по Cr достигает 8 раз для жабр и 14 раз для печени, у судака – до 2 раз, что, вероятно, связано с различиями в образе жизни и типе питания этих видов.

Иерархическая кластеризация матриц «рыба × металлы» показала, что по мышцам, печени и жабрам выделяются кластеры, почти полностью или полностью составленные из рыбы р. Шешмы (рисунок 5).

Применение линейных смешанных моделей (LMM) с учётом размера, возраста и тканеспецифичности позволило установить Cd как наиболее надежный индивидуальный индикатор различий между реками у обоих видов: межречной эффект по Cd остаётся высокозначимым во всех моделях и органах (рисунок 6), тогда как Pb обладает дополнительной диагностической ценностью только для леща и требует учёта размерно возрастной структуры выборки.

Многомерные методы (PERMANOVA, PCA, db-RDA, кластеризация) выявили устойчивый градиент загрязнения, связанный с нефтедобычей в бассейне Шешмы, и показали, что набор индикаторных элементов и их вклады в оси ординации зависят от ткани: у леща наибольшую диагностическую ценность имеют Cd и Pb в мышцах, Cr, Ni и Pb в печени, Cd и Cr в жабрах; у судака – Cd и Pb в мышцах, Cu, Cd и Pb в печени и Cd в жабрах.

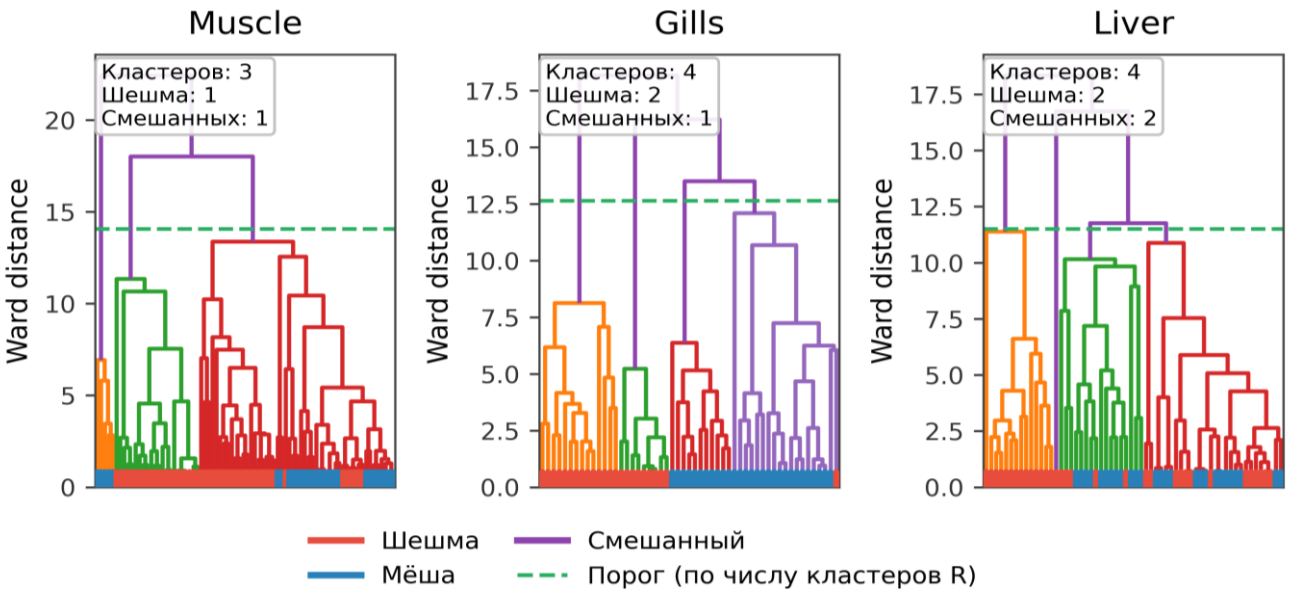


Рисунок 5 – Иерархическая кластеризация рыб по содержанию металлов в мышцах, жабрах и печени (метод Уорда, z-нормировка по каждому элементу в пределах ткани)

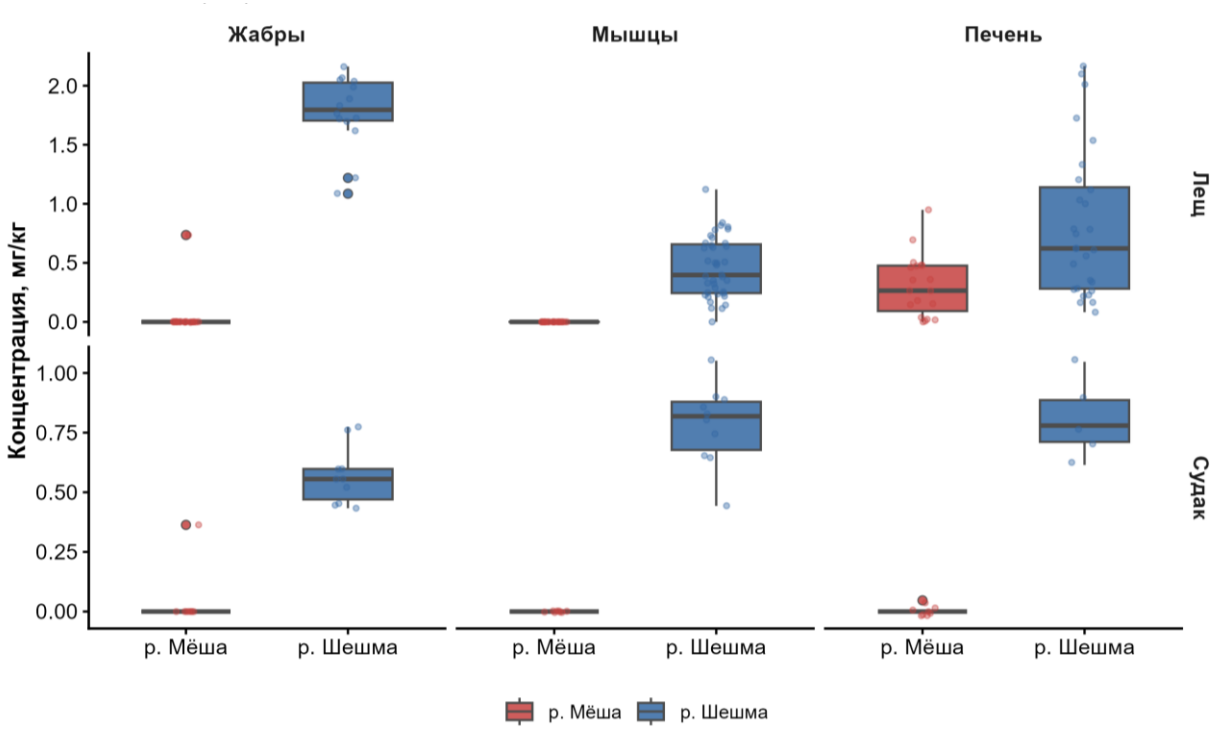


Рисунок 6 – Концентрация Cd в тканях рыб из р. Мёши и р. Шешмы, мг/кг

Интегральная оценка влияния нефтедобывающей деятельности на речные экосистемы. На основе совокупности абиотических и биотических данных разработан пошаговый алгоритм диагностики нефтедобывающего влияния на речные экосистемы, построенный по принципу последовательной верификации: каждый следующий этап уточняет выводы предыдущего и снижает вероятность как ложноположительной, так и ложноотрицательной оценки. Общая схема алгоритма представлена на рисунке 7.

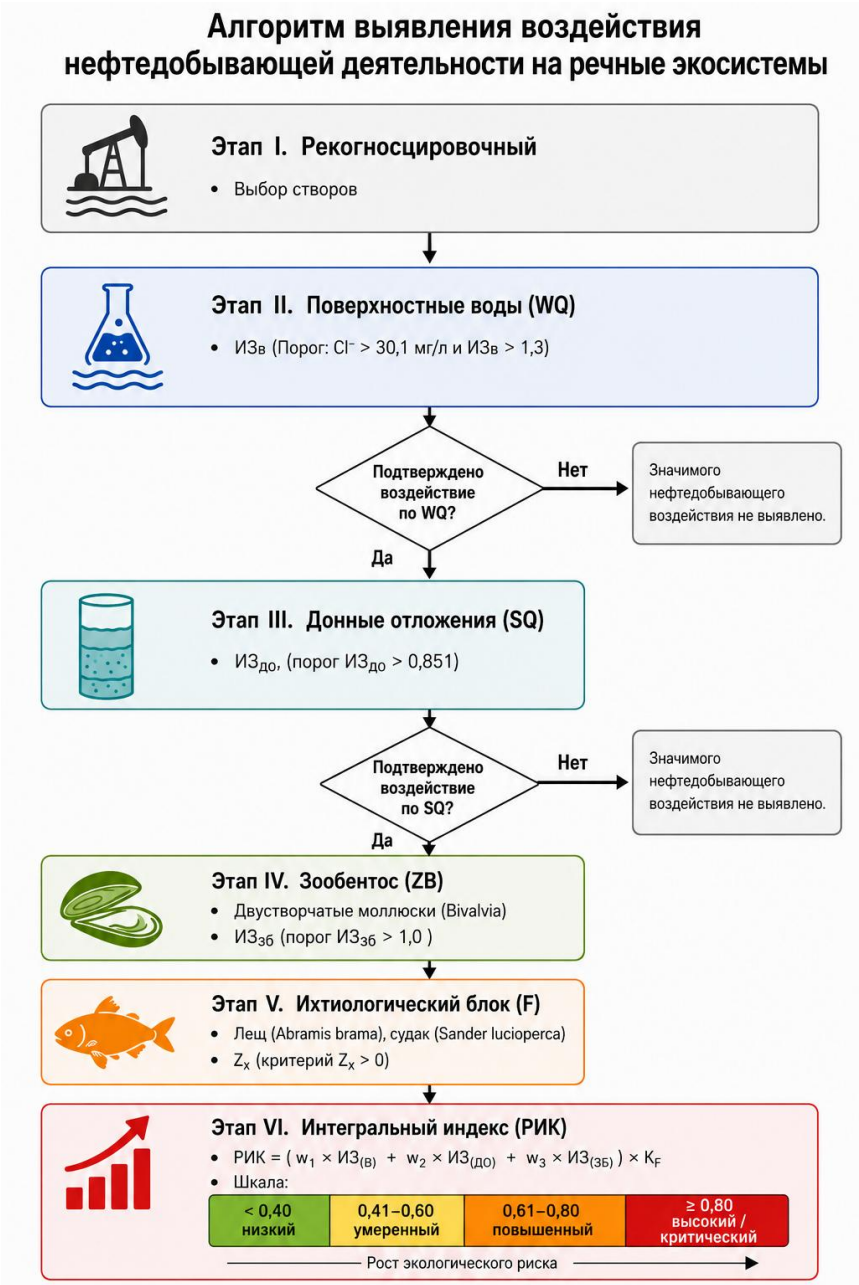


Рисунок 7 – Схема алгоритма диагностики влияния нефтедобывающей деятельности

На первом этапе выполняется картографическая оценка размещения объектов нефтедобычи, трубопроводов и участков исторических разливов, на основе которой формируется сеть станций отбора проб.

На втором, гидрохимическом этапе состояние водной среды оценивается по комплексу маркеров Cl^-, Mo, Sr, Pb и Cd, и по результатам $ИЗ_В$ принимается решение о целесообразности перехода к более ресурсоемким этапам.

Третий этап направлен на анализ донных отложений как долговременного депо загрязняющих веществ с использованием интегрального индекса $ИЗ_{ДО}$, основанного на нефтепродуктах, сумме ПАУ и ассоциированных металлах Cd, Cu, Pb и Zn. На четвертом этапе оценивается состояние зообентоса по двустворчатым моллюскам с применением индекса $ИЗ_{ЗБ}$ на базе элементов Ba, Sr и Zn, отражающего интегральный эффект хронического нефтяного влияния. Пятый этап включает анализ тканей леща и судака как высшего трофического уровня для подтверждения поступления токсикантов по пищевой цепи. Заключительным этапом является расчет интегрального индекса качества речных экосистем РИК, объединяющего субиндексы по воде, донным отложениям и зообентосу с учетом ихтиологического корректора K_F:

$$РИК = (w_1 \times ИЗ_В + w_2 \times ИЗ_{ДО} + w_3 \times ИЗ_{ЗБ}) \times K_F,$$

где w_1, w_2, w_3 – весовые коэффициенты блоков, определяемые по результатам PCA.

Близость весов (w_1 = 0,344, w_2 = 0,342, w_3 = 0,314) свидетельствует о сбалансированном вкладе гидрохимической, донно-геохимической и биологической линий доказательств в формирование РИК. Поскольку ихтиологический материал не имел привязки к местам отбора проб

воды и донных отложений, в расчет введен корректирующий коэффициент K_F, основанный на индексе полиметаллического загрязнения рыб и ограниченный диапазоном 0,80-1,20, что позволяет учитывать сигнал высшего трофического уровня без доминирования над пространственными абиотическими и зообентосными данными.

Расчет РИК показал четкое разделение объектов: для контрольной реки среднее значение индекса составило 0,19 ± 0,10 при диапазоне 0,08-0,38, тогда как для модельной реки – 1,05 ± 0,01; различия между реками статистически значимы (p=0,036). Тем самым РИК обеспечивает интегральное ранжирование речных экосистем по уровню нефтедобывающего влияния и объединяет в единую диагностическую систему гидрохимические, геохимические и биотические показатели. Предложенная четырехблочная система диагностики влияния нефтедобывающей деятельности на речные экосистемы обладает рядом концептуальных преимуществ.

Калибровка модели по медианным значениям р. Мёши как регионального геохимического фона Закамья, а не по общенормативным ПДК, позволяет устранить систематическое завышение показателей риска, характерное для территорий с природно-повышенными концентрациями элементов. Стандартизация проб ДО по гранулометрическому составу и содержанию органического вещества снижает аналитический шум, что обеспечивает корректное выделение нефтехимического кластера Pb–Zn–Cd (PC2, 13,0 % дисперсии) на фоне литогенного Fe–Mn-сигнала (PC1).

Включение биотических блоков обусловлено их диагностической специфичностью. Зообентосный индекс $ИЗ_{ЗБ}$ фиксирует интегральное воздействие за весь период жизни моллюсков, нивелируя краткосрочные флуктуации гидрохимического состава. Ихтиологический блок верифицирует хроническое поступление токсикантов по пищевым цепям.

Разработанная система обеспечивает: (1) классификацию речных водных объектов по уровню нефтедобывающего влияния с общей точностью 94,98 % на анализируемой выборке и количественное ранжирование по четырехуровневой шкале РИК; (2) идентификацию ведущих маркеров загрязнения для конкретного водного объекта; (3) оптимизацию объема мониторинговых исследований на основе последовательного применения блоков диагностического алгоритма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нефтедобывающая деятельность оказывает многокомпонентное влияние на экосистемы малых рек, обусловленное поступлением нефтепродуктов, полициклических ароматических углеводородов, пластовых вод, сопутствующих металлов и технологических реагентов. Диагностика такого влияния осложняется перераспределением загрязняющих веществ между поверхностными водами, донными отложениями и биотой, пространственно-временной изменчивостью гидрологических и гидрохимических условий, а также неоднородностью природного геохимического фона. В этих условиях оценка, основанная преимущественно на отдельных гидрохимических показателях, не позволяет установить согласованность изменений абиотических и биотических компонентов и дать целостную характеристику состояния речной экосистемы.

В диссертационной работе применен комплексный подход к оценке влияния нефтедобывающей деятельности на малые реки, основанный на последовательном сопоставлении

гидрохимических, геохимических и биоиндикационных данных. Такой подход позволяет интерпретировать различия между исследуемыми речными системами не по отдельному показателю, а с учетом распределения загрязняющих веществ в абиотических компонентах и их накопления в биоте.

Результаты исследования интегрированы в иерархический алгоритм мониторинга и интегрального индекса качества речных экосистем, в структуре которого объединены субиндексы состояния поверхностных вод, загрязнения донных отложений и биоаккумуляции в зообентосе и рыбе. Предложенный подход позволяет переходить к комплексной оценке речных экосистем. Его применение обосновано для малых рек при сопоставимых природно-геохимических условиях и наличии референтного водотока.

ВЫВОДЫ

1. Поверхностные воды реки, испытывающей влияние нефтедобычи, отличаются от референтной по структуре гидрохимического состава. Геохимическими маркерами нефтедобычи установлены хлориды, Mo, Sr, Cd и Pb. Разработанный алгоритм трехступенчатой диагностики (хлоридный порог 30,1 мг/л, вероятностная классификация, используемая при привышении интегральным индексом величины 1,3), обеспечивает идентификацию влияния объектов нефтедобычи на качество поверхностных вод в условиях высокого природного геохимического фона.

2. В донных отложениях реки, испытывающей влияние нефтедобычи, сформирована техногенная геохимическая ассоциация Pb–Zn–Cd, отсутствующая в референтной реке; содержание нефтепродуктов в сравнении с референтной рекой выше в 1,7 раза, сумма ПАУ – в 2,9 раза, коэффициент канцерогенной опасности $К_{ПАУ}$ – в 5,6 раза. Разработан интегральный показатель загрязнения донных отложений, учитывающий содержание нефтепродуктов, суммы ПАУ, Cd, Cu, Pb и Zn. Его значения позволяют дифференцировать участки малых рек по степени техногенной трансформации донных отложений под влиянием объектов нефтедобычи: условно фоновые участки – при значениях менее 0,851; умеренно трансформированные – при значениях от 0,851 до 2,311; выраженно трансформированные – при значениях более 2,311.

3. В тканях двустворчатых моллюсков *Bivalvia sp* р. Шешмы установлено накопление группы элементов Ba–Sr–Zn, отражающая длительное влияние нефтедобывающей деятельности. Содержание Sr в тканях моллюсков исследуемой реки на 41 % выше средних значений референтной реки ($p = 0,04$). Индекс загрязнения зообентоса, рассчитываемый по нормированным концентрациям Ba, Sr и Zn, позволяет фиксировать превышение фонового уровня накопления маркерных элементов при превышении индексом величины 1,0 и может использоваться для выявления участков с признаками длительного нефтедобывающего влияния. Двустворчатые моллюски *Bivalvia sp.* могут быть включены в биоиндикационный блок экологического мониторинга малых рек нефтедобывающих регионов.

4. Использование мышечной ткани, жабр и печени леща *Abramis brama* и судака *Sander lucioperca* обосновано тем, что тканевые профили накопления Cd, Pb, Cr, Ni и Cu дают взаимодополняющую информацию о биоаккумуляции металлов. Приоритетным биоаккумуляционным маркером влияния нефтедобычи является Cd в тканях леща *Abramis brama* ($\beta = 6,44$; $p = 2,16 \cdot 10^{-46}$) и судака *Sander lucioperca* ($\beta = 5,18$; $p = 1,52 \cdot 10^{-20}$). Для леща дополнительным

маркером является Pb (β = 2,28; p = 0,025); его интерпретация требует учета размерно-возрастной структуры выборки.

5. Разработан интегральный индекс качества речных экосистем, объединяющий субиндексы загрязнения поверхностных вод, донных отложений и зообентоса с весовыми коэффициентами 0,344, 0,342 и 0,314 соответственно. При расчете индекса предложено использовать корректирующий коэффицент для учета интегральной характеристики ихтиофауны на уровне речного объекта по обобщенному показателю накопления химических элементов в тканях рыб относительно референтного состояния.

6. Четырехуровневая шкала РИК обеспечивает отнесение участков малых рек к низкому, умеренному, повышенному или высокому уровню влияния нефтедобывающей деятельности; для референтной р. Мёши значение РИК составило 0,19 ± 0,10, для исследуемой р. Шешмы – 1,05 ± 0,01, что соответствует низкому и высокому уровням влияния нефтедобычи соответственно.

7. Разработан иерархический алгоритм системного экологического мониторинга влияния нефтедобывающей деятельности на малые реки, предусматривающий последовательную оценку по блокам «вода → донные отложения → зообентос → ихтиофауна». Алгоритм включает скрининговую оценку поверхностных вод по калиброванному региональному пороговому значению содержания хлоридов 30,1 мг/л и интегральному индексу загрязнения вод, оценку донных отложений по индексу загрязнения донных отложений, биоиндикационную оценку моллюсков поинтегральному индексу состояния зообентоса и оценку биоаккумуляции металлов в тканях леща *Abramis brama* и судака *Sander lucioperca* по коэффициенту K_F. Интегральная классификация разграничивает референтные водотоки и водотоки, испытывающие влияние нефтедобычи с точностью 97 % при коэффициенте согласия *Kappa* – 0,9, что позволяет использовать алгоритм в системе производственного и государственного мониторинга нефтедобывающих регионов.

Перспективы дальнейших исследований связаны с апробацией разработанной системы биогеохимических маркеров, индексов и иерархического алгоритма на других малых реках нефтедобывающих регионов Российской Федерации. Дальнейшее развитие исследования предполагает расширение биоиндикационного блока за счет показателей структуры макрозообентосных сообществ, физиолого-биохимических и гистопатологических характеристик рыб, а также проведение многолетних наблюдений в различные гидрологические фазы. Это позволит уточнить пространственно-временную изменчивость диагностических признаков, повысить обоснованность интегральной оценки и определить границы применимости разработанного подхода.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России по специальности 1.5.15. Экология (химические науки):

1. Клевлеева Т.Р. Факторы формирования токсикогенной нагрузки в донных отложениях малых рек республики Татарстан / Т.Р. Клевлеева, **Л.В. Новикова**, Н.Ю. Степанова, Д.А. Семанов // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. – 2013. – Т.155, кн.2 – С.147-156. (ВАК, Scopus).

2. Stepanova N.Yu. Comparison of toxicity of sediments from rivers with different levels of anthropogenic load (Middle Volga region, Russia) based on elutriate and whole sediment tests / N.Yu. Stepanova, T.R. Latypova, **L.V. Novikova** // Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki. – 2016. – Т. 158, кн. 3. – С. 416-439. (ВАК, Scopus)

3. **Новикова Л.В.** Сравнительная оценка качества воды рек с разным типом антропогенной нагрузки на водосборе по гидрохимическим индексам / **Л.В. Новикова**, И.Б. Выборнова, Н.Ю. Степанова // Вестник технологического университета. – 2017. – Т.20, №23. – С.91-95 (ВАК).

4. **Новикова Л.В.** Содержание ПАУ в мышечной ткани рыб разного трофического уровня в малых реках с разным типом антропогенной нагрузки / **Л.В. Новикова**, Н.Ю Степанова, Р.В. Окунев // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – №8 (146). – DOI: 10.60797/IRJ.2024.146.18 (ВАК(К1), GeoRef).

Статьи, опубликованные в других рецензируемых научных журналах, включая индексируемые в международных базах данных и системах цитирования:

5. **Новикова Л.В.** Использование многомерного анализа для выделения гидрохимических маркеров антропогенного воздействия / **Л.В. Новикова**, Н.Ю. Степанова // Экологический мониторинг и моделирование экосистем. – 2026. – Т. XXXVII, № 1-2. – С. 133-155 – DOI: 10.24412/2782-3237-2026-1-2-133-155. (ВАК).

6. **Novikova L.V.**The Content of Metals in Tissues and Organs of Fish of Different Trophic Levels in the Estuary of the Kama River / **L.V. Novikova**, A.R. Gaisin, N.Yu. Stepanova // I IOP Conference Series Earth and Environmental Science. – 2019. – №272. – 022211. – С. 1-6. (Scopus).

7. Stepanova N.Yu. Sediments as Indicators of Petrochemical Industrial Effluents / N.Yu. Stepanova, V.Z. Latypova, O.V. Nikitin, **L.V. Novikova,** F.M. Shakirova // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. – 2019. – № 272 – 022168. – С. 1-6. (Scopus)

Публикации в сборниках научных трудов и материалов конференций:

8. **Новикова Л.В.** Оценка качества природных вод и донных отложений в районе интенсивной нефтедобычи / Л.В. Новикова, Т.Р. Клевлеева, Н.Ю. Степанова // Чистая вода. Казань: сборник трудов IV Международного конгресса. – Казань, 2013. – С. 168-171

9. **Новикова Л.В.** Качество воды р. Мёша // Экологические проблемы регионов: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. – Иркутск, 2017. – С. 229-233.

10. **Новикова Л.В.** Оценка уровня загрязнения донных отложений реки Шешма по химическим показателям / **Л.В. Новикова**, Н.Ю. Степанова // Химия и инженерная экология: XVII Международная научная конференция: сборник статей. – Казань, 2017. – С. 264-267.

11. **Новикова Л.В.** Загрязнение донных отложений рек в районах интенсивной нефтедобычи на примере р. Шешма и её притоков / **Л.В. Новикова**, Н.Ю. Степанова // Окружающая среда и устойчивое развитие регионов. Экологические вызовы XXI века: труды III Международной конференции – Казань, 2017 – С. 432-434.

12. Гайсин А.Р. Особенности накопления металлов в тканях и органах рыб различного трофического уровня в Мешинском заливе Куйбышевского водохранилища / Гайсин А.Р., **Новикова Л.В.**, Степанова Н.Ю. // Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы: материалы VI Всероссийской конференции. – Ярославль, 2017. – С. 12-14

13. **Новикова Л.В.** Характеристика качества донных отложений реки Мёша / **Новикова Л.В.**, Гайсин А.Р., Степанова Н.Ю., Мельникова А.В. // Индикация состояния окружающей среды: теория, практика, образование: труды 6 Международной научно-практической конференции. – Москва, 2018. – С. 418-423.

14. **Новикова Л.В.** Оценка уровня экологического риска здоровью населения при употреблении рыбы из реки Шешма / **Л.В. Новикова,** А.Р. Гайсин, А.В. Мельникова // Химия и инженерная экология – XVIII: сборник трудов Международной научной конференции. – Казань, 2018. – С. 79-81.

15. Гайсин А.Р. Содержание металлов в мышцах и печени леща (*Abramis brama*) в реках Шешма и Кама / А.Р. Гайсин, **Л.В. Новикова,** Н.Ю. Степанова // Современные проблемы и перспективы развития рыбохозяйственного комплекса: материалы VI научно-практической конференции молодых учёных с международным участием. – Москва, 2018. – С. 64-66.

16. **Новикова Л.В.** Содержание металлов в тканях и органах леща (*Abramis Brama*) в реке Мёша / **Л.В. Новикова**, А.Р. Гайсин, Н.Ю. Степанова // Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XVII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Т. Книга 2. – Киров, 2019. – С. 353-356.

17. **Новикова Л.В.** Особенности накопления элементов в мышцах и печени леща (Abramis brama) в реках Шешма и Белая / **Л.В. Новикова,** А.Р. Гайсин, Н.Ю. Степанова // Химия и инженерная экология – XIX: сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 150-летию периодической таблицы химических элементов. – Казань, 2019. – С. 178-181.

18. Мельникова А.В. Сравнительный анализ содержания элементов в бентосных организмах рек Шешма и Мёша на примере двустворчатых моллюсков (*Bivalvia*) / А.В. Мельникова, **Л.В. Новикова**, А.Р. Гайсин // Химия и инженерная экология – XIX: сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 150-летию периодической таблицы химических элементов. – Казань, 2019. – С. 230-234.

19. **Novikova L.** Accumulation of metals in fish from the river in the area with intensive oil production / **Novikova L.**, Gaisin A., Stepanova N. // 19th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019: conf. proc. – 2019. – V.19, №3.1. – С.11-16. DOI 10.5593/sgem2019/3.1/S12.002.

20. **Новикова Л.В.** О содержании ПАУ в рыбе р. Меша / **Л.В. Новикова**, Н.Ю. Степанова // Географическое пространство: сбалансированное развитие природы и общества: материалы III Международной научно-практической конференции. – Челябинск, 2023. – С. 156-159.

21. **Новикова Л.В.** Сезонная динамика химического состава воды реки Мёши / **Л.В. Новикова,** Н.Ю. Степанова // Современное состояние водных биоресуров и аквакультуры: материалы научно-практической VII Международной конференции. – Новосибирск, 2024. – С. 113-119.