

На правах рукописи



РЕШЕТНЯК ОЛЬГА СЕРГЕЕВНА

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ
ТРАНСФОРМАЦИИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА
И КАЧЕСТВА РЕЧНЫХ ВОД ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ**

Специальность – 1.6.21. Геоэкология

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

Ростов-на-Дону – 2024

Работа выполнена на кафедре геоэкологии и прикладной геохимии
Института наук о Земле ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

Научный
консультант

Закруткин Владимир Евгеньевич,
доктор геолого-минералогических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

Официальные
оппоненты

Миньковская Роза Яковлевна,
доктор географических наук, ФГБУН «Федеральный исследова-
тельский центр «Морской гидрофизический институт РАН»

Савенко Алла Витальевна,
доктор геолого-минералогических наук, ФГБОУ ВО «Москов-
ский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Савичев Олег Геннадьевич,
доктор географических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Нацио-
нальный исследовательский Томский политехнический универ-
ситет»

Ведущая
организация

ФГБУН «Федеральный исследовательский центр Южный
научный центр РАН», г. Ростов-на-Дону

Защита состоится «14» ноября 2024 года в 15-00 часов на заседании объединенно-
го совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соис-
кание ученой степени доктора наук 99.0.075.03 при ФГБУН ФНИЦ «Владикавказский на-
учный центр РАН», ФГБОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический
университет имени академика М.Д. Миллионщикова», ФГБОУ ВО «Чеченский государ-
ственный университет им. А.А. Кадырова» по адресу: 362002, г. Владикавказ,
ул. Маркова, 93а (ГФИ ВНИЦ РАН).

Отзывы на автореферат (заверенные печатью, в двух экземплярах) просим на-
правлять по адресу: 364051, г. Грозный, пр. Х. Исаева, 100, на имя ученого секретаря
диссертационного совета 99.0.075.03 З.Ш. Гагаевой. E-mail: geodissovets@mail.ru. Факс:
8 (8712) 22-36-07.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ГГНТУ им. ака-
демика М.Д. Миллионщикова» и на сайтах: https://gstou.ru/science/dissertation_council/d999.228.03.php и vak.minobrnauki.gov.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук



З. Ш. Гагаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Формирование химического состава природных вод определяется совокупностью физических, химических и биологических процессов, происходящих на водосборе и в самом водном объекте, и зависит от региональных природно-климатических особенностей ландшафтов. Антропогенное воздействие нарушает эти естественные процессы и приводит к трансформации химического состава и качества природных вод. В последние десятилетия учеными отмечается усиление значимости антропогенного фактора в формировании химического состава и качества природных вод. Антропогенное воздействие на водные объекты приводит не только к изменению качества водной среды, но и к нарушению функционирования водных экосистем и формированию экологического риска (Никаноров и др., 2016). В современных условиях антропогенного воздействия проблемы рационального природопользования и охраны водных ресурсов становятся жизненно важными, особенно в промышленных и густонаселенных районах европейской части России (ЕЧР), где сложилась напряженная экологическая ситуация, сформировались техногенно нарушенные геосистемы (Закруткин и др., 2016) и возросла вероятность возникновения на водных объектах чрезвычайных экологических ситуаций, как природного, так и антропогенного характера (Никаноров и др., 2012).

В таком контексте большое значение приобретает оценка изменчивости химического состава и качества речных вод ЕЧР с учетом природных особенностей их функционирования в условиях антропогенной нагрузки, особенно в многолетнем аспекте. Не менее значимым и актуальным является совершенствование научно-методических подходов к комплексной оценке качества речных вод и состояния водных объектов с учетом региональных особенностей. Это позволит получать более объективную информацию о качестве природных вод и его изменчивости под влиянием природных и антропогенных факторов, а также разрабатывать экологически обоснованные мероприятия по улучшению качества воды и сохранению естественного состояния речных вод, формирующихся в различных природно-климатических условиях.

Степень разработанности темы

Началом развития данной тематики можно считать 70–80-е годы прошлого столетия, когда появилось много публикаций, касающихся региональных аспектов гидрохимических исследований природных вод. Однако основное внимание уделялось только изучению закономерностей изменения содержания главных ионов и органических веществ в природных водах (О.А. Алекин, Г.С. Коновалов, А.А. Зенин, М.П. Смирнов, М.Н. Тарасов и др.).

Современный период исследований в области изучения закономерностей формирования химического состава и оценки качества воды является достаточно насыщенным с точки зрения проводимых работ, научных направлений, используемых методологических подходов и методов. Обращает на себя внимание широкий спектр публикаций по рассматриваемой тематике в зарубежных изданиях. Работы в данном направлении лежат на стыке географической, гидрохимической и гидробиологической отраслей науки и тесно связаны с геоэкологическими и ландшафтно-экологическими исследованиями геоэкосистем (Hakanson L., Mauer F.L., Baron J.S., Dobiesz N.E. et al.). Анализ современных тенденций в мировой и отечественной науке в области изучения формирования качества воды и состояния водных объектов различных природных зон показал, что основную долю исследований занимают работы, посвященные изучению

региональных особенностей функционирования геоэкосистем во всей их сложности внутрисистемных взаимодействий и разнообразии. При этом важным является экосистемный подход, бассейновый принцип исследования речных экосистем и учет природного (фоновое) содержания химических веществ в речных водах различных природных зон. Однако комплексирование данных подходов во многих исследованиях отсутствует.

Речные бассейны ЕЧР наиболее изучены по сравнению с другими регионами России. В последние несколько лет опубликовано большое количество работ, статей и монографий по вопросам трансформации качества воды и состояния речных экосистем ЕЧР в условиях климатических изменений и антропогенного воздействия сотрудниками Гидрохимического института (А.М. Никаноров, В.А. Брызгалов, Л.С. Косменко и др.), Института водных проблем РАН (Р.Г. Джамалов и др.), Южного федерального университета (В.Е. Закруткин и др.), Южного научного центра РАН (Г.Г. Матишов и др.). Авторами рассмотрена изменчивость качества речных вод и состояния речных экосистем крупных бассейнов рек ЕЧР, таких как Печора, Северная Двина, Ока, Дон и Волга (А.М. Никаноров, В.А. Брызгалов, Л.С. Косменко, Р.Г. Джамалов, О.С. Решетняк и др.), изучено содержание поллютантов в речных водах, отклик гидробиоценозов на загрязнение водной среды и многолетняя изменчивость состояния малых и средних рек Юга ЕЧР в условиях техногенеза.

В то же время при наличии достаточно большого количества публикаций, посвященных изучению проблемы изменчивости качества воды природных вод различных природных зон ЕЧР, практически отсутствуют комплексные работы, направленные на системное изучение пространственно-временных закономерностей трансформации химического состава и качества воды с учетом гидрохимической зональности, что определяет актуальность данного исследования.

Цель исследования – выявить пространственно-временные закономерности трансформации химического состава и качества речных вод ЕЧР и разработать научно-методические подходы к комплексной оценке качества речных вод с учетом региональных особенностей.

В соответствии с поставленной целью сформулированы и решены следующие **основные задачи исследования**:

- изучить зональные особенности формирования химического состава и качества речных вод ЕЧР, выявить гидрохимические аномалии;
- выявить пространственно-временные закономерности изменчивости химического состава и качества речных вод ЕЧР с учетом антропогенного воздействия;
- провести анализ существующих методических подходов к оценке качества воды и состояния водных объектов;
- разработать алгоритм комплексной оценки качества речных вод и состояния участков рек с учетом экосистемного подхода и региональных особенностей формирования химического состава и качества воды;
- провести комплексную оценку качества речных вод на примере участков рек Кольского полуострова и степной зоны бассейнов Северского Донца и Тузлова.

Научная новизна

Впервые на обширном фактическом материале, охватывающем более 250 участков рек различных природных зон ЕЧР и многолетний период (более 30 лет), выявлены зональные особенности химического состава речных вод и подтверждена гидрохимическая зональность в изменении концентраций главных ионов в современных условиях антропогенного воздействия. Показано, что происходит увеличение содержания глав-

ных ионов и биогенных веществ с севера на юг и с запада на восток. Выявлена тенденция снижения содержания соединений некоторых тяжелых металлов при смене природных зон.

Впервые для речных участков ЕЧР показано, что нарушение гидрохимической зональности проявляется в формировании положительных «гидрохимических аномалий» естественного или антропогенного типа, наибольшее число аномальных значений выявлено в содержании сульфатов и ионов кальция.

Впервые определены тенденции изменчивости химического состава речных вод ЕЧР за многолетний период. Выявлены разнонаправленные тенденции изменчивости концентраций химических веществ по большинству показателей с преобладанием убывающих трендов. Показано, что наибольшая частота превышения ПДК наблюдается по содержанию в воде органических веществ, соединений железа и меди во всех рассмотренных природных зонах, а для цинка – в зонах тундры и лесотундры и в зоне тайги.

Впервые для столь обширной территории проведена оценка качества воды и выявлена пространственно-временная неоднородность степени загрязненности воды как внутри природных зон ЕЧР, так и между ними. Показано, что качество воды участков рек меняется от 2-го («слабо загрязненная» вода) до 5-го («экстремально грязная» вода), но большинство исследуемых речных участков характеризуются стабильной степенью загрязненности воды – «загрязненные» и/или «очень загрязненные» (3-й класс качества).

Предложена концептуальная схема (алгоритм) комплексной оценки качества воды и состояния речных участков с использованием регионального геохимического фона и комплекса показателей. Впервые на примере речных участков степной зоны ЕЧР проведена региональная оценка качества воды и состояния участков рек для оценки влияния объектов угольной промышленности на речные системы (в Ростовской области).

Теоретическая и практическая значимость работы

Представленные в работе результаты исследования являются базовыми для общей гидрохимии и отдельных разделов региональной гидрохимии, вносят вклад в совершенствование методологии оценки качества поверхностных вод и состояния водных экосистем.

Результаты исследования могут быть использованы при планировании природоохранной деятельности в пределах водосборов рек ЕЧР, при оценке современного их экологического состояния и разработке экологически обоснованных водоохранных мероприятий, при оценке антропогенного влияния на уровень загрязненности водных объектов. Результаты могут быть также применены профильными экологическими организациями для разработки региональных критериев оценки качества воды и состояния водных объектов.

Материалы исследований могут использоваться при решении конкретных региональных прикладных задач в области управления водными ресурсами, оценки и прогноза качества воды рек Юга ЕЧР, восстановления и сохранения их экосистем, а также при реализации водоохранных мероприятий.

Результаты диссертационного исследования использованы при разработке учебных пособий, чтении лекционных курсов по дисциплинам «Гидрохимия и охрана водных ресурсов», «Методы и средства контроля качества поверхностных вод», «Устойчивое развитие и экологическая безопасность» и проведении практических занятий, учебных комплексных практик студентов кафедры геоэкологии и прикладной геохимии Южного федерального университета по направлению подготовки 05.03(04).06. Экология и природопользование.

Материалы и методы исследований

Теоретическую основу настоящего исследования составляют основные фундаментальные постулаты в области учения о биосфере и природных водах В.И. Вернадского, гидрохимии природных вод О.А. Алекина, А.М. Никанорова и др., геохимии ландшафтов А.И. Перельмана, Н.С. Касимова, М.А. Глазовской, Ю.Е. Саета, Е.П. Янина и др., гидроэкологии водных экосистем Ю.А. Израэля, В.А. Абакумова, В.П. Жукинского и др., оценки изменений водных ресурсов различных территорий под влиянием антропогенных факторов Н.И. Коронкевича, Р.Г. Джамалова, Н.И. Алексеевского и др., районирования и оценки экологической напряженности территорий В.Е. Закруткина, Б.И. Кочурова и др.

Информационной основой данного исследования по выявлению изменчивости химического состава и качества речных вод ЕЧР являются многолетние данные (1985-2017 гг.) государственной системы наблюдений за состоянием и загрязнением окружающей среды Росгидромета в части наблюдений за поверхностными водами суши.

Материалами исследования также являются результаты, полученные в ходе выполнения ряда грантов РФФИ, РНФ (гранты РФФИ № 12-05-00084 (а), № 14-05-00144, № 18-05-60165; гранты РНФ № 14-17-00376, № 17-17-01262) и научного проекта № 63-НИР/ФЦП-2016 при реализации ФЦП «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах» в период работы в Гидрохимическом институте. В основу диссертационного исследования также положены материалы полевых экспедиционных и камеральных работ, выполненных автором в составе научной группы кафедры геоэкологии и прикладной геохимии ЮФУ в 2014-2016 гг. при реализации гранта РНФ № 14-17-00376.

Комплексный характер исследований определил необходимость применения методов, используемых в геоэкологии, гидрохимии, гидрологии, гидробиологии, геохимии и смежных областях. Работы проводились в соответствии с действующими нормативными документами, руководствами и методическими указаниями в области геоэкологии и рационального природопользования.

Основные принципы оценки качества воды и состояния водных объектов разработаны на основе многолетних исследований сотрудниками Гидрохимического института и адаптированы автором с учетом специфики региональных условий формирования химического состава речных вод на территории ЕЧР. Изучение речных участков проводилось по единой методической схеме: 1) оценка особенностей химического состава воды, выявление аномалий и трендов за многолетний период; 2) оценка качества воды и его изменчивости; 3) оценка состояния речных вод по гидрохимическим показателям; 4) для отдельных участков рек степной зоны – оценка уровня загрязненности воды и донных отложений (ДО) по отношению к фоновым характеристикам, выявление степени токсичности воды.

Оценка качества воды и степени ее загрязненности проводилась по комплексной методике на основе значений удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ). Комплексная оценка качества поверхностных вод по гидрохимическим показателям позволяет учесть влияние широкого перечня загрязняющих веществ, оценить их вклад в загрязненность водной среды (РД 52.24.643 – 2002). Оценка состояния абиотической компоненты водных систем проводилась по интегральным гидрохимическим показателям качества воды, таким как содержание легкоокисляемых органических веществ (ЛОВ) по показателю БПК₅ и концентрация азота аммонийного согласно (согласно Р 52.24.661, Р 52.24.776).

Оценка уровня загрязненности водных экосистем по состоянию загрязненности

ДО проводилась согласно методике, разработанной сотрудниками Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (Сае́т, Янин и др., 1999). Методика усовершенствована в части комплексности: дополнительно к показателю – уровень загрязненности ДО относительно регионального фона, введены суммарный показатель загрязненности воды по отношению к фоновому содержанию химических веществ и степень токсичности водной среды (Закруткин и др., 2020).

На основе анализа существующих методических подходов предложен алгоритм комплексной оценки качества воды и состояния речных участков по комплексу показателей, на основе балльного подхода, с учетом экосистемного подхода и региональных особенностей формирования химического состава и качества воды.

Личный вклад автора заключается в развитии классических основ гидрохимии в части обоснования гидрохимической зональности и основ региональной гидрохимии в современных условиях природопользования в бассейнах рек ЕЧР, в совершенствовании и разработке комплексного подхода к оценке качества воды рек с учетом региональных особенностей и фоновых характеристик.

Автором проведены сбор, обобщение и анализ многолетних фоновых и справочно-режимных данных о химическом составе и качестве вод рек ЕЧР. Проанализированы существующие отечественные и зарубежные подходы в области оценки качества воды и состояния водных объектов. Выполнен основной комплекс работ в части составления табличного материала, картосхем, анализа и интерпретации полученных результатов, сформулированы выводы и основные закономерности. Часть результатов диссертационной работы является итогом многолетних исследований, в которых автор принимала участие в разные годы в составе научных коллективов Гидрохимического института, Южного федерального университета и Института водных проблем РАН в рамках выполнения договоров, научного проекта № 63-НИР/ФЦП-2016 и грантов РФФИ (№ 12-05-00084, № 14-05-00144, № 18-05-60165), РНФ (№ 14-17-00376, № 17-17-01262). Автор принимала непосредственное участие во всех стадиях исследований от постановки задач до публикации результатов исследований в научных журналах, участвовала в полевых экспедиционных и камеральных работах. Все основные обобщения выполнены автором лично, на всех этапах работы результаты исследования обсуждались с коллегами и научным консультантом.

Достоверность и апробация результатов

Достоверность полученных результатов исследования обеспечивается использованием обширных многолетних данных и материалов, в том числе полученных в экспедиционных исследованиях, применением различных методов и подходов к анализу и обобщению гидрохимической информации, способов оценки качества воды.

Результаты докладывались на 18 научных и научно-практических конференциях, 11 из которых имели международный статус.

Всего по теме диссертационного исследования опубликовано более 100 работ. Основные положения диссертации изложены в отдельных разделах трех монографий, одного Атласа и в 53 статьях, опубликованных в рецензируемых международных и российских научных журналах (28 – в журналах, индексируемых в Scopus/WoS, 25 – в журналах, рекомендованных ВАК). В рамках проведенных исследований созданы и зарегистрированы две базы данных.

База данных: Макрокомпоненты речных вод в бассейне р. Северский Донец (в пределах Ростовской области) (Свидетельство о государственной регистрации базы

данных № 2020620677 от 15.04.2020 г.).

База данных: Химический сток рек Европейской части арктической зоны России (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020621168 от 08.07.2020 г.).

Работа соответствует паспорту специальности 1.6.21. Геоэкология:

п. 4. «Глобальные и региональные экологические кризисы – комплексные изменения окружающей среды и ее компонентов...»; п. 5. «Природная среда и индикаторы ее изменения под влиянием естественных природных процессов и хозяйственной деятельности человека (химическое и радиоактивное загрязнение ... поверхностных и подземных вод...)»; п. 14. «Научные основы организации геоэкологического мониторинга природно-технических систем и обеспечение их экологической безопасности».

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и приложений. Объем работы составляет 368 страниц текста, включая 46 картосхем и рисунков, 69 таблиц, список литературы из 315 наименования работ отечественных и зарубежных авторов.

Благодарности

Автор выражает признательность своему научному консультанту, доктору геолого-минералогических наук, профессору Закруткину Владимиру Евгеньевичу за консультации и неоценимую помощь, искреннюю благодарность коллегам по лаборатории дистанционных и химико-биологических методов наблюдений за состоянием и загрязнением водных объектов Гидрохимического института Л.С. Косменко, А.О. Даниленко и М.Ю. Кондаковой за совместную работу при выполнении отдельных частей исследования, за поддержку и критические замечания. Автор выражает особую признательность всем своим коллегам преподавателям кафедры геоэкологии и прикладной геохимии ЮФУ за совместные экспедиционные исследования и Е.Н. Бакаевой за данные токсикологических исследований, использованные в работе, коллегам из лаборатории гидрогеологических проблем охраны окружающей среды Института водных проблем РАН Р.Г. Джамалову, Т.И. Сафроновой, К.Г. Калагур и К.Г. Власову за поддержку и помощь в подготовке картографического материала.

Особая признательность безвременно ушедшему чл.-корр. РАН, д.г.-м.н., профессору А.М. Никанорову за советы и веру в автора работы.

Основные защищаемые положения

1. Химический состав речных вод европейской части России характеризуется пространственной неоднородностью и, за редкими исключениями, подчиняется принципу гидрохимической зональности. В многолетнем аспекте при смене природных зон с севера на юг происходит увеличение медианных концентраций главных ионов, биогенных и легкоокисляемых органических веществ на фоне снижения содержания соединений железа и цинка.

Европейская часть России характеризуется широким биоклиматическим диапазоном – от арктической пустыни и тундры до полупустынь и пустынь. Такая сложность строения территории обуславливает необходимость учета региональных особенностей формирования химического состава воды (Решетняк и др., 2017, Решетняк, 2018). Важнейшими природными факторами формирования химического состава речных вод ЕЧР являются количество и интенсивность осадков, химический состав почв и грунтов, их увлажненность. Данные факторы подчиняются принципу гидрохимической зональности, обуславливая закономерное изменение химического состава воды рек при смене природных зон с севера на юг.

Химический состав природных вод является важнейшим показателем, определяющим качество воды и степень ее загрязненности, по нему можно классифицировать воды по их минерализации, составу, оценивать обеспеченность водных объектов питательными веществами, необходимыми для развития водной флоры и фауны, оценивать уровень загрязненности воды, выявлять источники загрязнения, определять пригодность воды конкретному виду водопользования и др. (Никаноров, 2008; Решетняк, Никаноров, 2018).

В современных условиях антропогенного воздействия на природные геосистемы происходит повышение фоновых характеристик различных водных систем, усиливаются внутри- и межгодовые колебания концентраций химических соединений в водной среде, изменяются закономерности процессов формирования химического состава поверхностных вод. Такая неоднородность в формировании природных особенностей речных вод ЕЧР и усиление антропогенной нагрузки проявляются в изменчивости концентраций химических веществ (Никаноров и др., 2016; Решетняк, 2018, Решетняк и др., 2013; 2017, 2022).

Исследование выполнено на основе многолетних данных государственной системы наблюдений Росгидромета, а также на основе результатов исследований в рамках грантов: РФФИ, РНФ и договорных работ. На начальном этапе исследования проведена группировка участков рек ЕЧР по природным зонам и физико-географическим провинциям (ФГП) с учетом особенностей зонального типа ландшафтов (использованы границы ФГП приведенные на картах Геопортала МГУ www.geogr.msu.ru:8082/FGR/).

В исследование включено более 250 участков рек ЕЧР, находящихся в различных ФГП и различных природных зонах. В зонах тундры и лесотундры изучено 9 участков рек, тайги – 93 участка, в зоне смешанных и широколиственных лесов – 82 участка, в зонах лесостепей и степей – 73 участка рек. Используются материалы о химическом составе и качестве воды рек ЕЧР, обобщенные за период с 1985 по 2017 г., по таким гидрохимическим показателям, как главные ионы (хлориды, сульфаты, гидрокарбонаты, ионы кальция, ионы магния), биогенные вещества (азот аммонийный и азот нитратный), органические вещества (по БПК₅ и ХПК), нефтепродукты, соединения железа, меди, никеля, цинка и марганца.

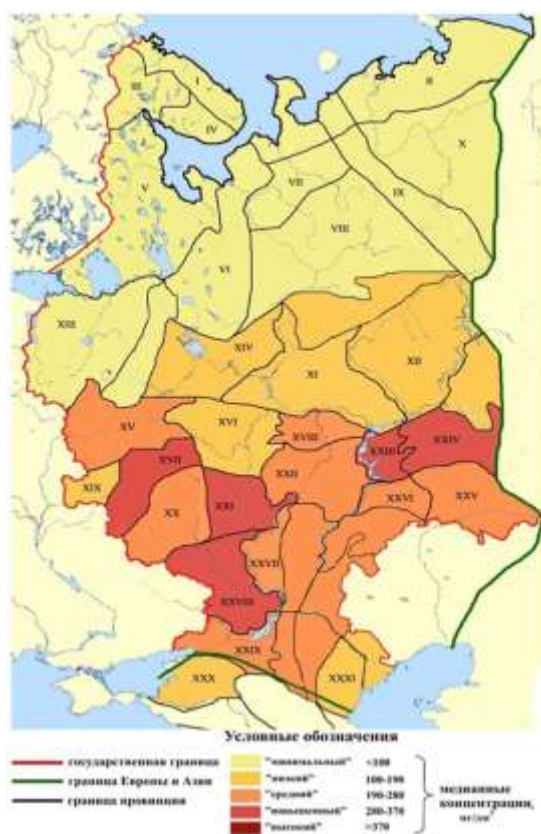
Многочисленные исследования химического состава природных вод ЕЧР, выполненные в прошлом столетии, были посвящены изучению главных ионов отдельных рек, бассейнов или природных зон, ионному стоку рек в период, когда антропогенное воздействие было не столь значительным. За последние десятилетия произошли значительные преобразования на водосборах ЕЧР, изменилась структура природопользования и антропогенная нагрузка на фоне климатических изменений, что обуславливает необходимость изучения трансформации химического состава и качества речных вод по всей территории ЕЧР с учетом принципа зональности и ландшафтных особенностей.

Анализ многолетних данных о химическом составе воды участков рек ЕЧР, распределенных по ФГП и природным зонам, позволил выявить пространственную неоднородность, которая проявляется в определенной гидрохимической зональности. К показателям, характеризующимся возрастанием с севера на юг медианных концентраций, относятся главные ионы (хлориды, сульфаты, гидрокарбонаты, ионы магния и кальция) (рис. 1), минеральные формы азота, легкоокисляемые органические вещества (ЛОВ по БПК₅). В число показателей, характеризующихся убыванием с севера на юг медианных концентраций, вошли соединения железа и цинка (рис. 2), к не имеющим направленности изменения концентраций – нефтепродукты, соединения меди, марганца и органическое вещество (по ХПК). Сложившуюся гидрохимическую обстановку в различных ФГП природных зон и происходящих в них процессах характеризует, в первую очередь, ионно-солевой состав вод. Общая тенденция изменчивости многолетних медианных концентраций главных ионов характеризуется возрастанием с севера на юг. В южном направлении возрастает удельное число атипичных водных объектов с относительно высокими концентрациями главных ионов, обусловленными распространением известняков, сульфатных пород и их растворением (химической денудацией).

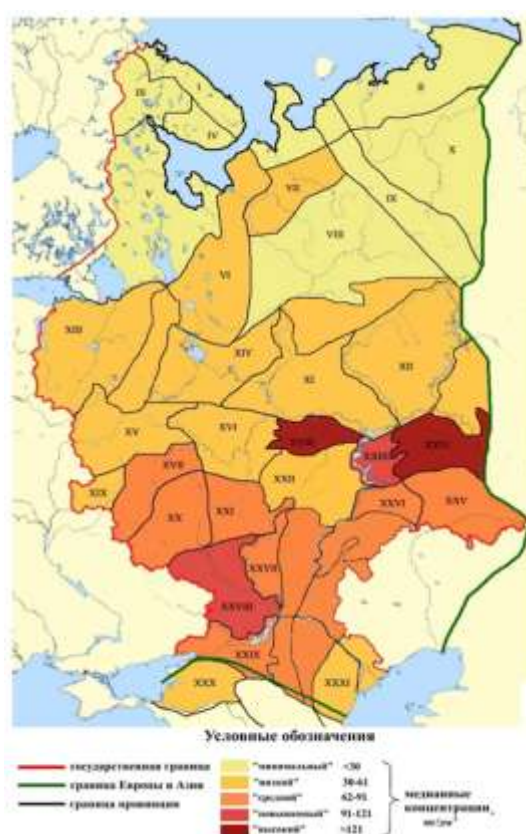
Зональные изменения медианных концентраций главных ионов и биогенных веществ представлены в таблице 1, органических веществ и соединений тяжелых металлов – в таблице 2. Для большинства участков рек практически во всех ФГП медианные концентрации ряда химических веществ превышают установленные нормативные значения. Это касается органических веществ (по ХПК), соединений железа, меди во всех рассмотренных природных зонах, а для цинка – в зонах тундры, лесотундры, тайги и в зоне смешанных и широколиственных лесов.

Кратность превышения ПДК по органическим веществ и соединениям цинка не высока и находится на уровне 1–2 ПДК. Превышение норматива по содержанию соединений железа и меди минимально в речных водах зон лесостепей и степей (в среднем 1–2 ПДК) и максимально в северных зонах (до 3–4 ПДК).

Таким образом, формирование химического состава речных вод в пределах ЕЧР происходит за счет разнообразного комплекса геохимических факторов, процессов и явлений, что, в конечном счете, и обуславливает его достаточно выраженную региональную неоднородность. При этом формируются области распространения речных вод с повышенным естественным содержанием отдельных химических веществ. Региональная зональная неоднородность химического состава воды ЕЧР должна учитываться при изучении качества речных вод, экологического состояния рек в условиях техногенного загрязнения природных вод.



(а)

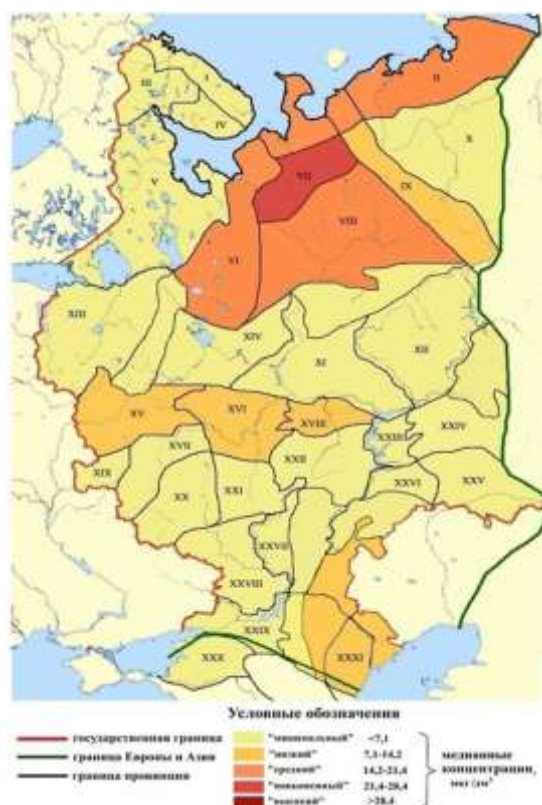


(б)

Рисунок 1 – Изменчивость содержания гидрокарбонатов (а) и ионов кальция (б) в речных водах ЕЧР (Разработка... (этап 1), 2016)



(а)



(б)

Рисунок 2 – Изменчивость содержания соединений железа (а) и цинка (б) в речных водах ЕЧР (Разработка... (этап 1), 2016)

Таблица 1 – Зональное изменение медианных концентраций (мг/дм³) главных ионов и биогенных веществ в реках ЕЧР (1985–2017 гг.)

Природная зона (зоны)	Главные ионы					Биогенные вещества	
	хлориды	сульфаты	гидро- карбонаты	ионы кальция	ионы магния	N (NH ₄ ⁺)	N (NO ₃ ⁻)
Тундра и лесотундра	<u>2,7-23,8</u> 6,3	<u>3,1-30,1</u> 9,5	<u>7,3-79,3</u> 40,3	<u>1,8-20,2</u> 10,6	<u>0,8-5,0</u> 2,8	<u>н.о.*-0,20</u> 0,07	<u>0,01-0,27</u> 0,04
Тайга	<u>1,0-38,9</u> 6,0	<u>2,5-219,9</u> 23,3	<u>3,7-318,0</u> 88,3	<u>1,4-115,5</u> 24,3	<u>0,6-21,4</u> 7,0	<u>н.о.-0,42</u> 0,11	<u>н.о.-0,69</u> 0,10
Зона смешанных и широколиственных лесов	<u>2,7-40,0</u> 14,0	<u>5,0-480,0</u> 44,2	<u>22,0-300,5</u> 172,6	<u>6,2-219</u> 52,4	<u>2,4-58,6</u> 13,2	<u>н.о.-1,50</u> 0,31	<u>0,04-2,02</u> 0,49
Лесостепи и степи	<u>6,4-282,0</u> 53,5	<u>20,2-524,0</u> 104,8	<u>94,9-394,7</u> 260,3	<u>30,1-196</u> 82,5	<u>5,7-58,7</u> 25,1	<u>0,05-0,74</u> 0,26	<u>0,13-2,97</u> 0,83

Примечание: в числителе приведены диапазоны медианных концентраций, в знаменателе – среднее значение для природной зоны; *н.о. – ниже предела обнаружения метода химического анализа компонента.

Таблица 2 – Зональное изменение медианных концентраций органических веществ (мг/дм³) и соединений тяжелых металлов в речных водах ЕЧР (1985–2017 гг.)

Природная зона (зоны)	Органические вещества (ОВ)			Соединения тяжелых металлов				
	ЛОВ (БПК ₅)	ОВ (ХПК)	нефте- продукты	Fe	Cu*	Zn*	Ni*	Mn*
Тундра и лесотундра	<u>0,50-2,60</u> 1,57	<u>11,7-31,7</u> 18,8	<u>н.о.**-0,04</u> 0,02	<u>0,14-0,96</u> 0,37	<u>1,7-5,0</u> 3,16	<u>н.о.-29,7</u> 12,1	<u>н.о.-31,0</u> 8,8	<u>6,0-43,0</u> 20,8
Тайга	<u>0,50-3,07</u> 1,50	<u>5,30-49,9</u> 25,4	<u>н.о.-0,16</u> 0,03	<u>0,05-0,86</u> 0,34	<u>0,6-7,0</u> 2,70	<u>н.о.-33,2</u> 10,6	<u>н.о.-41,0</u> 3,7	<u>4,0-100,0</u> 33,5
Зона смешанных и широколиственных лесов	<u>1,00-5,10</u> 2,19	<u>13,0-75,0</u> 27,3	<u>н.о.-0,12</u> 0,04	<u>0,06-1,87</u> 0,30	<u>н.о.- 6,0</u> 3,10	<u>н.о.-27,0</u> 7,0	<u>н.о.-14,5</u> 3,9	<u>н.о.-135,0</u> 39,2
Лесостепи и степи	<u>1,40-3,75</u> 2,51	<u>8,80-35,0</u> 22,0	<u>н.о.-0,14</u> 0,04	<u>0,01-0,38</u> 0,11	<u>н.о. - 5,0</u> 1,65	<u>н.о.-8,0</u> 2,7	<u>н.о.-6,0</u> 1,7	<u>н.о.-213,0</u> 33,7

Примечание: в числителе приведены диапазоны медианных концентраций, в знаменателе – среднее значение для природной зоны;
*концентрации указаны в мкг/дм³; **н.о. – ниже предела обнаружения метода химического анализа компонента.

2. Нарушение гидрохимической зональности проявляется в формировании положительных гидрохимических аномалий в речных водах ЕЧР. Гидрохимические аномалии характеризуются повышенным содержанием соединений типоморфных элементов. Наибольшее количество гидрохимических аномалий выявлено в зонах тайги, смешанных и широколиственных лесов. По показателям наибольшая доля аномалий характерна для сульфатов и ионов кальция. В пространственном распределении выделяются отдельные территории с преобладанием гидрохимических аномалий антропогенного типа (например Кольский полуостров) или с формированием аномалий преимущественно естественного генезиса (в бассейнах рек в зоне тайги – Северная Двина, реки Карелии и др.).

Нарушение гидрохимической зональности приводит к формированию аномальных значений гидрохимических параметров или гидрохимических аномалий. Под гидрохимической аномалией понимается «участок гидрохимического поля какого-либо компонента, группы компонентов или общей минерализации вод, характеризующийся повышенными или пониженными значениями по сравнению с окружающим фоном» (Словарь..., 1988). Гидрохимические аномалии могут образоваться как под влиянием рудных тел, первичных и вторичных ореолов рассеяния в породах рудных месторождений, так и под влиянием других причин, в частности концентрирования кларковых содержаний химических элементов в литосфере (Маккавеев, 1971).

Гидрохимические аномалии можно классифицировать на положительные (превышение фоновых значений концентраций) и отрицательные (аномально низкие значения концентраций), по своему генезису – естественные (природно-обусловленные) и антропогенные, образование которых связано с хозяйственной деятельностью человека. Порог аномальности концентраций определяли как величины, отличающиеся от среднестатистического значения содержания вещества в природной зоне на 2 стандартных отклонения (слабая аномалия) и 3 стандартных отклонения (уверенная аномалия) (Криночкин, 2011).

Как было отмечено в работах (Кондакова и др., 2017; Решетняк и др. 2017), важным моментом в характеристике гидрохимической аномалии в природных водах является вопрос о её генезе – естественная или антропогенная. При отсутствии внешнего воздействия и влияния глобальных факторов и без значимой антропогенной нагрузки химический состав речных вод, очевидно, должен быть устойчив во времени. С другой стороны, во многих природных зонах обнаруживаются те или иные тенденции изменения содержания химических веществ в речных водах (временные тренды). Очевидно, что увеличение содержания химических веществ тесно связано с усилением антропогенного воздействия, так что если гидрохимическая аномалия сопровождается возрастающим трендом, это говорит о её антропогенном генезисе за счет высокой антропогенной нагрузки (например, наличие мощных источников загрязнения воды рек в виде горнодобывающих и горнообогащительных фабрик, объектов металлургической или угольной отраслей и т.п.). Убывающий тренд при наличии аномально низких концентраций веществ, вероятно, так же связан с антропогенным воздействием, но не с ростом нагрузки а, напротив, с её снижением. Стабильно аномально высокие или аномально низкие концентрации того или иного вещества в водной среде «без каких-либо статистически значимых тенденций за 30-летний период говорят о вероятно естественном характере выявленных здесь аномалий» (Разработка... (этап 2), 2016; Кондакова и др., 2017).

Для выявления гидрохимических аномалий (ГХА) проведена статистическая обработка гидрохимических данных по каждому из 14 химических веществ для всех исследуемых речных участков ЕЧР. Из общего количества участков рек гидрохимические аномалии выявлены на 113 из них (то есть доля участков рек с аномалиями составила 43,9 %). На каждом из этих участков количество выявленных ГХА варьировало от 1 до 6. Всего из более, чем 3500 возможных значений (вариант медианных концентраций) выявлено 206 аномальных значений, что составило всего 5,9 % (Разработка... (этап 2), 2016).

Гидрохимические показатели по доле (% от общего числа) выявленных аномальных значений можно сгруппировать:

- 1) более 10 % случаев – это сульфаты (SO_4^{2-}) (18,4%) и ионы Ca^{2+} (10,7%);
- 2) от 5 до 10 % – это хлориды, ионы Mg^{2+} , HCO_3^- , N (NO_3^- , NH_4^+), ОВ (по ХПК), соединения Fe и Cu;
- 3) менее 5 % – это нефтепродукты, ЛОВ (по БПК₅), соединения Zn и Mn.

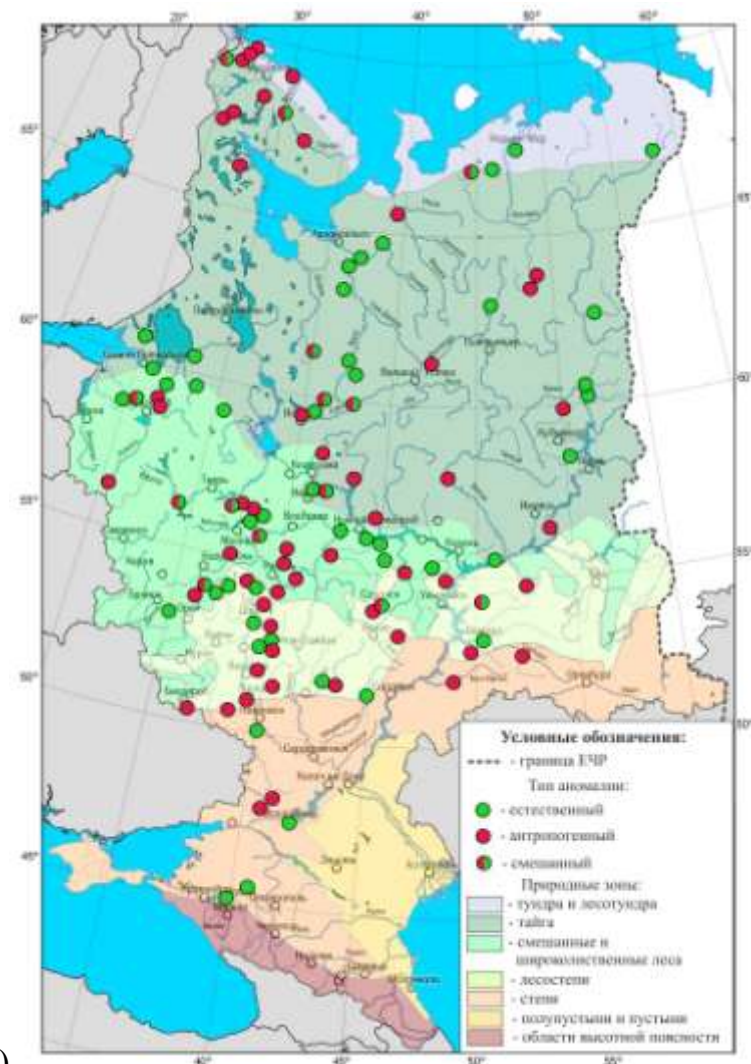
В распределении участков рек ЕЧР по количеству выявленных ГХА преобладают случаи, когда обнаружено всего по одной ГХА, что характерно для 52 % участков рек. По две аномалии выявлено в водной среде 29 % участков рек, по три аномалии – 6 %, по четыре аномалии – 10 %. И только на трех участках рек выявлено по пять ГХА (всего около 3 % от общего числа речных участков с аномальными значениями). Отмечается, что по своему происхождению в речных водах ЕЧР незначительно преобладают гидрохимические аномалии антропогенного типа – 53% (Разработка... (этап 2), 2016).

Пространственное распределение по природным зонам выделенных гидрохимических аномалий в речных водах ЕЧР представлено на рис. 3а, также приведена дифференциация ГХА естественного или антропогенного генезиса. Наибольшее количество гидрохимических аномалий (в абсолютных значениях) сформировалось в речных водах зоны тайги (75 значений) и зоны смешанных и широколиственных лесов (70 значений). С учетом того, что по площади зона тайги превосходит зону смешанных и широколиственных лесов, на карте визуально видно, что плотность распределения гидрохимических аномалий выше в последней (рис. 3б). Географически можно выделить районы в пределах ЕЧР с наибольшим «скоплением» гидрохимических аномалий – это западная часть центрального района ЕЧР (западная часть зоны смешанных и широколиственных лесов и зоны лесостепей).

Исходя из условных площадей природных зон ЕЧР (по сумме площадей ФГП, включенных в исследование) проведен расчет «плотности гидрохимических аномалий» в речных водах ЕЧР (таблица 3). Наименьшая «плотность гидрохимических аномалий» в речных водах отмечена в зонах тундры, лесотундры и тайги (0,050–0,055 ед./тыс. км²), а наибольшая – в зоне смешанных и широколиственных лесов (0,092 ед./тыс. км²).



а)



б)

Рисунок 3 – Пространственное распределение гидрохимических аномалий на участках рек ЕЧР по природным зонам:
а – количество аномалий; б – преобладающий тип аномалий (составлено автором)

Таблица 3 – Условное удельное (на тыс. км²) распределение гидрохимических аномалий в природных зонах ЕЧР

Природные зоны	Количество		Условная площадь зон/зоны, тыс. км ²	Плотность ГХА, ед./тыс. км ²
	ФГП	ГХА		
Зоны тундры и лесотундры	2	8	158,7	0,050
Зона тайги	10	75	1360,9	0,055
Зона смешанных и широколиственных лесов	7	70	758,8	0,092
Зоны лесостепей и степей	11	53	798,8	0,066
<i>Зона лесостепей</i>	4	36	407,4	0,088
<i>Зона степей</i>	7	17	391,3	0,043
Примечание: ФГП – физико-географическая провинция; ГХА – гидрохимическая аномалия.				

В пространственном распределении гидрохимических аномалий естественного (природного генезиса) или антропогенного типов выделяются территория Кольского полуострова с преобладанием аномалий антропогенного типа, бассейн реки Северная Двина и реки Карелии с формированием аномалий преимущественно естественного типа (рис. 3 б).

Таким образом, в пределах ЕЧР при движении с севера на юг возрастает доля участков рек с антропогенными аномалиями и снижается – с естественными, что связано с ростом антропогенной нагрузки на ландшафты в южных районах, с увеличением степени освоенности территорий, распаханности земель и возрастанием демографической нагрузки и др.

Основными причинами и факторами формирования естественных гидрохимических аномалий являются региональные процессы, такие как развитие карста за счет процессов химической денудации горных пород, наличие болотных вод, влияние морских вод на устьевых участках рек, усиление процессов выветривания доломитов, мергелей и др. легкорастворимых минералов, возрастание на Юге ЕЧР испарения, аридности климата и засоления почв (таблица 4).

Таблица 4 – Характеристика гидрохимических аномалий естественного типа (природного характера) в речных водах ЕЧР

Природная зона (зоны)	Участки рек (примеры)	Аномальные показатели	Источник (причина)
Лесотундра и тундра	Уса, Сула	Сульфаты ОВ (ХПК)	Развитие карста (химическая денудация), болотные воды
Тайга	Северная Двина, Кулой	Сульфаты	Влияние морских вод, развитие карста (химическая денудация)
Зона смешанных и широколиственных лесов	Упа, Сундовик, Луга	Кальций Магний Сульфаты	Выветривание доломитов, развитие карста (химическая денудация)
Лесостепи и степи	Карай, Северский Донец	Хлориды Хлориды и сульфаты	Рост аридности климата, засоления почв

Основной причиной формирования антропогенных гидрохимических аномалий является наличие постоянно действующих источников загрязнения речных вод – наличие предприятий горнодобывающей, нефтегазовой, химической, целлюлозно-бумажной промышленности, угольной отрасли, машиностроения и др., сточные воды которых обуславливают высокие концентрации загрязняющих веществ в речных водах ЕЧР.

3. Во временном аспекте проявляется разнонаправленность тенденций изменчивости концентраций химических веществ в воде рек ЕЧР по большинству показателей. В целом меньше всего трендов отмечается в изменчивости концентраций ионов магния, кальция и гидрокарбонатов (менее 50 % случаев), больше всего – для органических веществ, соединений марганца, железа и нефтепродуктов (70–85%). Большинство из выявленных тенденций имеют убывающую направленность, следовательно, можно прогнозировать улучшение качества речных вод ЕЧР в ближайшей перспективе.

Выявленная пространственная неоднородность концентраций химических веществ в речных водах различных физико-географических провинций и природных зон ЕЧР обуславливает важность и необходимость изучения многолетних тенденций изменчивости содержания веществ в речных водах. Важным этапом анализа временных рядов гидрохимических данных является исследование закономерностей трансформации компонентного состава воды, то есть обнаружение и характеристика основной тенденции содержания компонента в воде. Появление основной тенденции в изменении концентраций химических веществ может быть обусловлено действием ряда факторов, неоднородных по силе и направлению воздействия. Все факторы условно можно разделить на глобальные, вызывающие однонаправленные изменения на обширных территориях, и локальные, действующие на отдельные водные объекты или небольшие группы территориально близко расположенных водных объектов (Решетняк и др., 2019).

Выявление временных тенденций изменения концентраций веществ выполнено на основе корреляционного анализа. Для количественной оценки тенденций за 30-летний период был рассчитан ранговый коэффициент корреляции Кендалла, характеризующий меру линейной связи между датой отбора пробы воды и концентрацией вещества. Для расчета коэффициентов корреляции и уровня доверительной вероятности, при котором эти коэффициенты могут считаться статистически значимыми, был использован программный пакет Statistica v 13.3. В качестве независимой переменной выступали данные о дате отбора проб, ранжированные в порядке возрастания, в качестве зависимой переменной – данные о концентрациях химических веществ. Наличие статистически значимой прямой связи говорит о том, что более старым датам соответствуют более низкие концентрации вещества в пробах, при обратной связи более старым датам соответствуют более высокие концентрации. Соответственно, отрицательная величина коэффициента корреляции указывает на постепенное снижение во времени (за 30 лет) значений концентраций, положительная – об их постепенном возрастании (Решетняк и др., 2019).

Оценку тесноты корреляционной связи проводят по модулю значения коэффициента корреляции (r) по одной из многочисленных шкал. Учитывая неравномерность сроков отбора проб и сильную внутригодовую вариацию концентраций химических веществ, а также используя принцип разбивки диапазона значений r от 0 до 1,0 на равные отрезки, предложенный в работе (Власова В.В., 2006), трактовка тесноты связи по коэффициенту корреляции осуществлялась по следующим критериям (Решетняк и др., 2019): $0,10 \leq r < 0,25$ – связь слабая; $0,25 \leq r < 0,50$ – связь средняя (умеренная); $0,50 \leq r$

$< 0,75$ – связь сильная (тесная); $0,75 \leq r < 1,00$ – очень сильная связь. При $r < 0,10$ связь считается отсутствующей. Применение корреляционного анализа обоснованно тем, что это хороший оценочный метод для предварительной оценки направленности временных тенденций изменений химического состава и качества воды рек. В силу влияния на состав речных вод множества природных и антропогенных факторов и процессов, ожидать высокую линейную зависимость нельзя. Поэтому линейные тренды даже умеренной силы являются статистически значимыми для природных вод.

Для всех исследуемых участков рек ЕЧР по всем химическим веществам, включенным в исследование, были рассчитаны ранговые коэффициент корреляции Кендалла, определены временные тенденции (возрастающий, убывающий тренд или отсутствие тренда) и данные обобщены в целом по территории ЕЧР (рис. 4) и по природным зонам (таблица 5). Большинство выявленных тенденций имеют слабую или умеренную силу связи. Общий характер распределения тенденций изменчивости концентраций веществ в воде исследуемых рек ЕЧР разнонаправленный. Доля речных участков, для которых характерна убывающая тенденция изменения медианных концентраций веществ меняется от 6 (гидрокарбонаты) до 69 % (нефтепродукты), возрастающая – от 11 (ионы магния) до 38 % (гидрокарбонаты), с отсутствием выраженного тренда – от 15 (нефтепродукты) до 62 % (ионы кальция) (рис. 4).

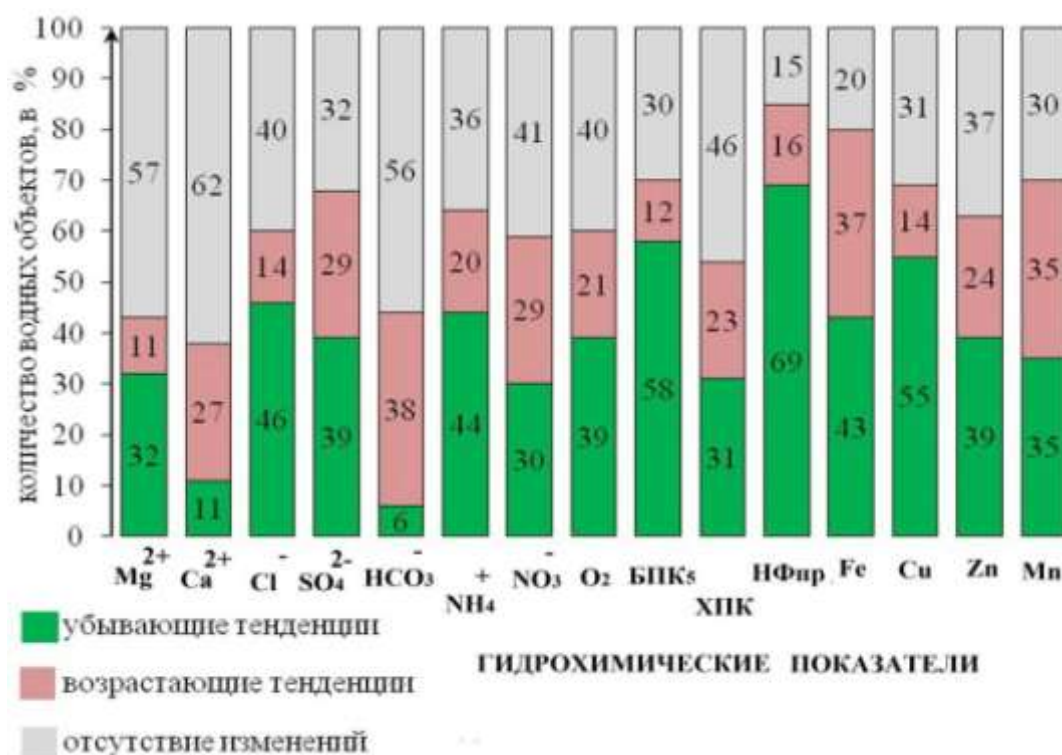


Рисунок 4 – Распределение тенденций изменчивости концентраций химических веществ в речных водах ЕЧР (Решетняк и др., 2017)

Результаты корреляционного анализа данных о химическом составе воды показали, что для речных вод зон тундры и лесотундры ЕЧР в большинстве случаев преобладают убывающие тенденции. Отсутствие статистически значимых трендов характерно для концентраций магния и кальция, для трех компонентов – гидрокарбонатов, азота нитратного и соединений железа – выявлено преобладание возрастающих трендов (таблица 5). Распределение тенденций изменчивости концентраций химических веществ в

речных водах зоны тайги ЕЧР более неоднородно. Для большинства показателей характерно преобладание убывающих тенденций или отсутствие статистически значимых трендов. Исключение составили азот нитратный с равномерным распределением основных тенденций и соединения железа – с преобладанием возрастающей динамики изменения концентраций (таблица 5).

Для участков рек зоны смешанных и широколиственных лесов ЕЧР выявлен разнонаправленный характер изменчивости тенденций. В целом преобладают убывающие тенденции и отсутствие значимого тренда в изменчивости концентраций веществ. И только для ионов кальция и соединений железа в речных водах этой зоны характерно наибольшее количество возрастающих трендов (таблица 5).

Таблица 5 – Распределение тенденций в речных водах ЕЧР по природным зонам (доля участков рек с определенной тенденцией, %)

Химические вещества	Природная зона (зоны)			
	лесотундра и тундра	тайга	зона смешанных и широколиств. лесов	лесостепи и степи
Ионы магния	78	62	57	52
Ионы кальция	78	75	43	54
Хлориды	44	44	48	44
Сульфаты	45	46	44	55
Гидрокарбонаты	67	61	60	42
Азот аммонийный	56	48	41	45
Азот нитратный	67	*	45	38
ЛОВ (по БПК ₅)	43	63	50	55
ОВ (по ХПК)	44	60	43	54
Нефтепродукты	56	65	74	65
Соединения железа	56	48	48	70
Соединения меди	50	53	51	55
Примечание: цветом обозначено:				
– убывающие тенденции,				
– возрастающие тенденции,				
– отсутствие значимого тренда,				
– равномерное распределение основных тенденций.				

В распределении основных тенденций изменчивости концентраций химических веществ в речных водах лесостепной и степной зон ЕЧР возрастает число показателей, для которых выявлены возрастающие тенденции (таблица 5). В динамике ионов магния, гидрокарбонатов и сульфатов высока доля участков рек с возрастающими трендами, что может быть вызвано усилением процессов выветривания горных пород и климатическими изменениями в степной зоне.

4. Пространственная неоднородность качества речных вод ЕЧР проявляется в изменчивости степени загрязненности воды рек как внутри природных зон, так и между ними. В зональной изменчивости с севера на юг прослеживается общая закономерность возрастания доли стабильно «очень загрязненных» (3-й класс) или «грязных» (4-й класс качества) речных участков, что обусловлено возрастанием

антропогенной нагрузки на фоне повышенного естественного содержания макрокомпонентов в реках южных районов. Временная динамика качества речных вод ЕЧР за период с 1990 по 2015 гг. проявляется в тенденциях к стабилизации или снижению степени ее загрязненности для большинства участков рек во все природных зонах ЕЧР, что положительно повлияет на качество воды в сторону его улучшения в будущем.

Оценка изменчивости качества речных вод проведена на основе многолетней гидрохимической информации и значений удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ). Для оценки временной динамики рассмотрены класс качества воды (ККВ) и степень ее загрязненности на исследуемых участках рек в природных зонах ЕЧР с разбивкой по пятилетиям (т.е. за многолетний период с 1990 по 2015 гг.). Результаты обобщения показали пространственно-временную неоднородность степени загрязненности воды на речных участках.

Качество воды и степень ее загрязненности на участках рек в зонах тундры и лесотундры ЕЧР за многолетний период характеризуются как:

- стабильно «очень загрязненные» и «загрязненные» (3-й ККВ) – это участки рр. Печенга, Териберка и Уса;
- переходные от «загрязненных» и «очень загрязненных» (3-й ККВ) к «слабо загрязненным» (2-й класс) – это участки рр. Ура, Уса;
- переходные от «грязных» (4-й ККВ) к «очень загрязненным» (3-й ККВ) – это участки рр. Печора, Колва и Адзьява;
- стабильно «грязные» (4-й ККВ) – это участок р. Сула (д. Коткино).

Анализ пространственно-временной изменчивости качества воды и степени ее загрязненности на участках рек в зонах тундры и лесотундры ЕЧР показал, что большинство исследуемых участков рек имеют тенденцию к стабилизации (44 %) или улучшению качества воды (33 %) в многолетнем аспекте (рис. 4).

Качество воды и степень ее загрязненности на участках рек в зоне тайги ЕЧР за многолетний период характеризуются как:

- стабильно «очень загрязненные» и «загрязненные» (3-й ККВ) – это большинство участков рек Пинего-Мезенской (VII), Мезенско-Двинской (VIII) и Тиманской провинций (IX), а также более половины речных участков Карельской (V), Онежско-Двинской (VI), Печорской (X) и Ветлужско-Унжинской (XI) провинций;
- переходные от «загрязненных» или «очень загрязненных» к «слабо загрязненным» – это половина речных участков Западно- и Восточно-Кольской провинций (III-IV), а также часть речных участков Печорской провинции (X);
- переходные от «грязных» (4-й ККВ) к «очень загрязненным» (3-й ККВ) или наоборот – это часть участков рек Ветлужско-Унжинской (XII) провинции и более половины исследуемых речных участков Вятско-Камской провинции (XII);
- стабильно «грязные» (4-й ККВ) – это незначительная часть речных участков практически во всех провинциях таежной зоны.

Анализ и обобщение преобладающих тенденций качества воды рек внутри каждой ФГП и в целом внутри зоны тайги показал, что (см. рис. 4):

- 1) большинство исследуемых участков рек имеют тенденцию к стабилизации или улучшению качества воды в многолетнем аспекте;
- 2) наибольшее количество участков рек с тенденцией к улучшению качества воды находятся в провинциях северной тайги – в Западно-Кольской (III), Тиманской (IX) и Печорской (X), а также в Ветлужско-Унжинской (XII) провинциях.



Обозначения: физико-географические провинции выделены римскими цифрами; природные зоны арабскими цифрами: 1 – зоны тундры и лесотундры. 2 – зона тайги, 3 – зона смешанных и широколиственных лесов, 4 – зоны лесостепей (4а) и степей (4б)

Рисунок 4 – Картосхема пространственного распределения преобладающих тенденций качества воды на участках рек физико-географических провинций и природных зон ЕЧР (составлено автором)

Пространственное распределение речных участков по степени загрязненности воды в зоне тайги ЕЧР рек внутри ФГП приведено в таблице 6.

Таблица 6 – Распределение речных участков (%) по степени загрязненности воды внутри провинций в зоне тайги ЕЧР

Провинция	Степень загрязненности (качество воды)			
	слабо загрязненная и загрязненная (2-3 ККВ)	загрязненная и очень загрязненная (3 ККВ)	загрязненная и грязная (3-4 ККВ)	стабильно грязная (4 ККВ)
Западно- и Восточно- Кольская	50,0	18,8	18,8	12,4
Карельская	33,3	66,7	–	–
Онежско-Двинская	–	66,7	–	33,3
Пинего-Мезенская	–	100,0	–	–
Мезенско-Двинская	–	83,3	–	26,7
Тиманская	–	83,3	–	26,7
Печорская	28,6	57,1	–	14,3
Ветлужско-Унжинская	–	60,0	40,0	–
Вятско-Камская	–	30,8	61,5	7,7
Всего	14,8	56,8	19,3	9,1

В целом можно отметить, что в зоне тайги качество воды большинства речных участков характеризуется 3-м классом, что соответствует степени загрязненности воды «загрязненная» и «очень загрязненная», а при движении от северной к южной тайге возрастает доля участков рек, вода которых характеризуется как стабильно «загрязненная» или «грязная».

Качество воды и степень ее загрязненности на участках рек в зоне смешанных и широколиственных лесов ЕЧР за многолетний период характеризуются как:

- стабильно «загрязненные» и/или «очень загрязненные» (3-й ККВ) – это участки рек Днепровско-Деснинской провинции (XIX), большинство участков рек Приокской (XVII), Прибалтийской (XIII) и Верхне-Волжской (XIV) провинций;

- переходные от «очень загрязненных» (3-й ККВ) к «грязным» (4-й ККВ) – это большинство участков рек Мещерской (XVI) и Смоленско-Московской (XV) провинций и стабильно «грязные» (4-й ККВ) – единичные участки рек последних двух провинций.

Обобщение преобладающих тенденций качества воды рек внутри каждой ФГП и в целом внутри зоны смешанных и широколиственных лесов показал, что (см. рис. 4):

1) подавляющее большинство исследуемых участков рек имеют тенденцию к стабилизации (70 %), тренд на улучшение качества воды характерен для 20 % участков рек в данной природной зоне ЕЧР;

2) наибольшее количество участков рек с тенденцией стабилизации качества воды находятся в трех провинций северо-западной части данной зоны ЕЧР – в Прибалтийской (XIII), Верхне-Волжской (XIV) и Смоленско-Московской (XV), а также в Ветлужско-Унжинской провинции (XII).

Пространственное распределение речных участков по степени загрязненности во-

ды в зоне смешанных и широколиственных лесов внутри ФГП приведено в таблице 7.

Качество воды большинства речных участков характеризуется 3-м классом («загрязненная» и «очень загрязненная»), а при движении от северных к южным провинциям возрастает доля речных участков, имеющих стабильно «очень загрязненные» или «грязные» воды. Таким образом, прослеживается снижение качества воды в зоне смешанных и широколиственных лесов при движении с севера на юг внутри зоны.

Таблица 7 – Распределение речных участков (%) по степени загрязненности воды внутри провинций в зоне смешанных и широколиственных лесов ЕЧР

Провинция	Степень загрязненности (качество воды)			
	загрязненная и очень загрязненная (3 ККВ)	загрязненная и грязная (3–4 ККВ)	стабильно грязная (4 ККВ)	грязная и очень грязная (4 ККВ)
Прибалтийская	56	22	22	–
Верхне-Волжская	67	6	27	–
Приокская	78	11	11	–
Северо-Приволжская	57	–	43	–
Днепровско-Деснинская	100	–	–	–
Смоленско-Московская	19	44	31	6
Мещерская	8	61	23	8
Всего	48	26	24	2

Качество воды и степень ее загрязненности на участках рек в зонах лесостепей и степей ЕЧР за многолетний период характеризуются как:

- «очень загрязненные» и «загрязненные» (3-й ККВ) – участки рек Среднерусской (XX) и Окско-Донской (XXI) провинций;
- переходные от «загрязненных» или «очень загрязненных» к «грязным» (4-й ККВ) более половины участков рек всех степных провинций;
- стабильно «грязные» (4-й ККВ) – участки рек Кинельско-Камской (XXIII), Бугульминско-Белебеевской (XXIV) и Приволжской (XXII) провинций.

Анализ и обобщение преобладающих тенденций качества воды рек внутри каждой ФГП и в целом внутри зон лесостепей и степей показал, что (см. рис. 4):

- 1) большинство исследуемых участков рек имеют тенденцию к стабилизации или улучшению качества воды в многолетнем аспекте;
- 2) наибольшее количество участков рек с тенденцией к улучшению качества воды находятся в более южных провинциях данных природных зон в таких, как Приволжская (XX), Хопер-Медведицкая (XXVII), Донецко-Донская (XXVIII) и объединенная Северо-Кавказская и Западно-Предкавказская (XXX).

Пространственное распределение количества речных участков в зонах лесостепей и степей ЕЧР по степени загрязненности воды рек внутри ФГП приведено в таблице 8. В изменчивости качества речных вод внутри зоны лесостепей прослеживается аналогичная закономерность – возрастает доля участков рек в более южных ФГП, вода которых характеризуется как стабильно «очень загрязненная» или «грязная» по УКИЗВ. В то

время как в зоне степей внутризональная изменчивость качества воды рек не прослеживается, больше всего речных участков имеют переходную степень загрязненности воды между 3-м и 4-м классами качества (53,8 %) (таблица 8). Таким образом, в зонах лесостепей и степей при движении с севера на юг пространственная закономерность изменения качества воды не очевидна.

Таблица 8 – Распределение речных участков (%) по степени загрязненности воды внутри провинций в зонах лесостепей и степей ЕЧР

Провинции	Степень загрязненности (качество воды)			
	загрязненная и очень загрязненная (3 ККВ)	загрязненная и грязная (3–4 ККВ)	стабильно грязная (4 ККВ)	грязная и очень грязная (4 ККВ)
Среднерусская	46,2	38,4	15,4	–
Окско-Донская	70,0	30,0	–	–
Приволжская	11,1	33,3	44,5	11,1
Кинельско-Камская и Бугульминско-Белебеевская	–	12,5	75,0	12,5
Все степные провинции (вместе)	23,1	53,8	23,1	–

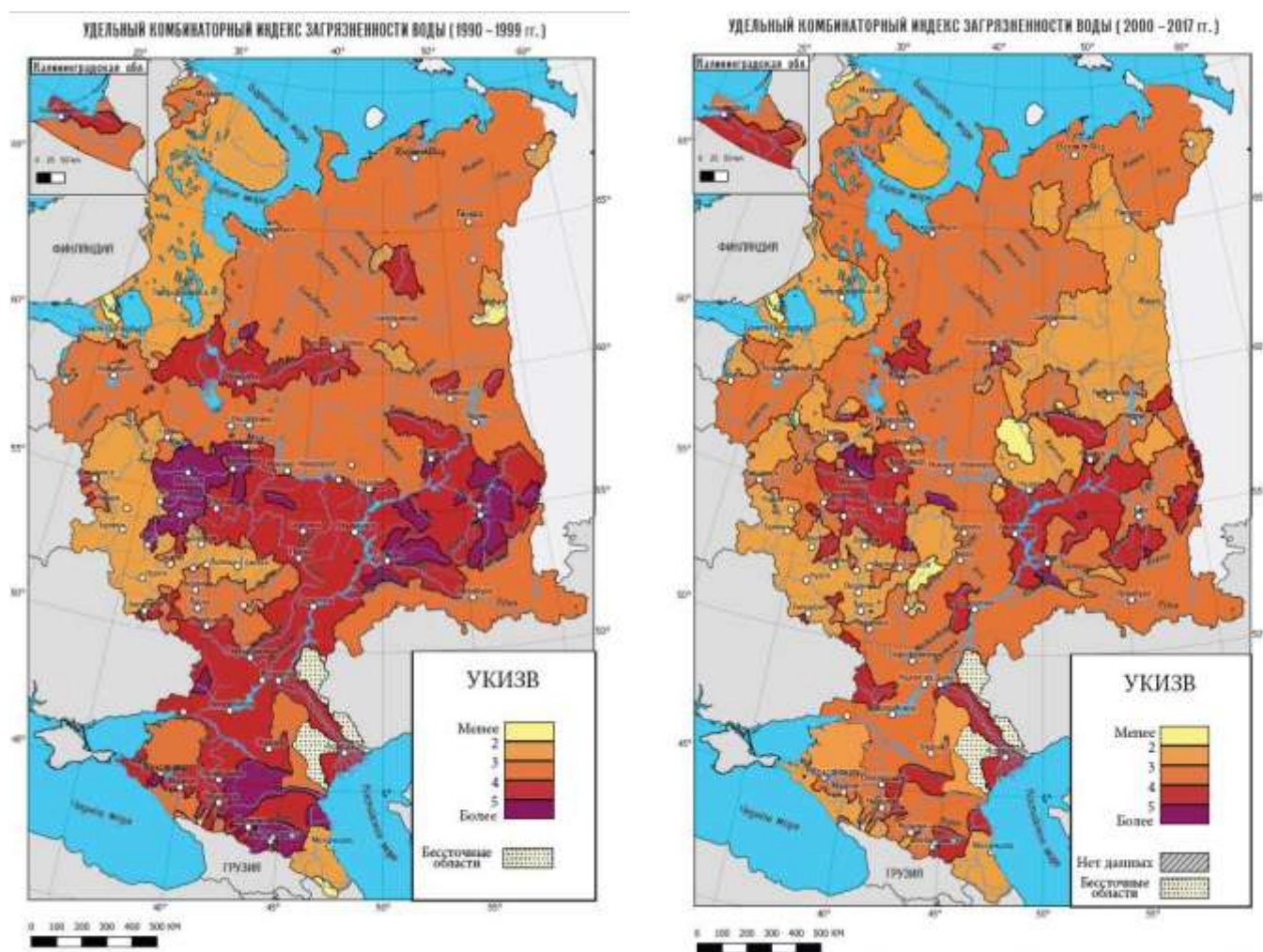
Обобщение данных о качестве речных вод по природным зонам позволило выявить пространственную неоднородность речных участков по степени загрязненности их водной среды. Большинство исследуемых речных участков ЕЧР по степени загрязненности воды характеризуются как стабильно «загрязненные» и/или «очень загрязненные», что соответствует 3-му классу качества воды. Доля таких речных участков составляет от 30,3 % (в зонах лесостепей и степей) до 56,8 % (в зоне тайги). Существенна также доля речных участков, находящихся в переходном состоянии, когда качество воды меняется в пределах 3-4 классов, и может достигать 39,4 % (в зонах лесостепей и степей) (таблица 9).

Таблица 9 – Распределение речных участков (в %) с разной степенью загрязненности воды по природным зонам ЕЧР

Природная зона (зоны)	Степень загрязненности воды (класс качества)			
	слабо загрязненная и загрязненная (2–3 ККВ)	загрязненная и очень загрязненная (3 ККВ)	загрязненная и грязная (3–4 ККВ)	грязная (4 ККВ)
Зоны тундры и лесотундры	22,2	44,4	22,2	11,1
Зона тайги	14,8	56,8	19,3	9,1
Зона смешанных и широколист. лесов	–	47,6	25,6	26,8
Зоны лесостепей и степей	–	30,3	39,4	30,3
Всего (по ЕЧР)	6,1	37,6	27,3	20,8

В целом в пространственном распределении значений УКИЗВ рек в пределах ЕЧР выделяются обширные области повышенных значений и, прежде всего, это водосборные бассейны реки Волга, Нижнего Дона и южные реки бассейна Каспийского моря. Именно для этих речных бассейнов характерны максимальные значения УКИЗВ – 4,0 и выше, что соответствует низкому качеству воды - 4-го класса качества («грязная» или «очень грязная»). Но, несмотря на это, во временной изменчивости качества речных вод наблюдается устойчивая тенденция к снижению значений УКИЗВ и улучшению качества речных вод в этих бассейнах рек (рис. 5).

Основными приоритетными загрязняющими веществами, высокие концентрации которых обуславливают высокую степень загрязненности воды в степной зоне («грязная», 4-й ККВ) являются соединения тяжелых металлов, органические вещества, азот нитритный (Решетняк, 2023), а также сульфаты, повышенное содержание которых обусловлено природными факторами.



А (1990–1999 гг.)

Б (2000–2017 гг.)

(Обозначения: значения УКИЗВ менее 2,0 соответствуют 2 классу качества («слабо загрязненная» вода), в интервале (2; 3] – 3 классу, разряд 3 «а», «загрязненная»; (3; 4] – 3 классу, разряд 3 «б», «очень загрязненная»; (4; 8] – 4 классу, разряд «а», «б» «грязная»)

Рисунок 5 – Изменчивость значений УКИЗВ и качества речных вод ЕЧР за много-летний период (Гидрохимический сток..., 2020)

Пространственно-временная динамика качества воды и степени ее загрязненности по пятилетним периодам (1990–2015 гг.)

Представленное выше сравнение качества воды на участках рек ЕЧР за два больших периода дает нам представление только об основной направленности изменчивости качества воды и степени ее загрязненности, которая проявляется в тенденции улучшения качества воды (в снижении значений УКИЗВ) на участках рек различных бассейнов и природных зон. Более детально можно проследить изменение качества речных вод ЕЧР по пятилетним периодам. На рис. 6–8 представлено схематичное распределение значений УКИЗВ и соответствующие им классы качества воды в бассейнах рек ЕЧР. Сравнительный анализ данных о качестве воды и степени загрязненности показал, что:

1) в период с 1990 по 1995 год наблюдалось улучшение качества воды рек в пределах зоны тайги в бассейне Печоры, в зоне смешанных и широколиственных лесов – в бассейне Камы и Оки, а также в зоне степей – в бассейне Нижнего Дона (рис. 6);

2) с 1995 по 2000 год сохранялись те же тенденции улучшения качества воды и снижения степени загрязненности воды рек, отмеченные за 1990–1995 гг., дополнительно отмечалось снижение загрязненности воды на участках рек в бассейне Верхней Волги и южнее в зоне лесостепей, также происходило незначительное ухудшение качества воды – севернее, для рек Карелии и Кольского полуострова (рис. 6 и 7);

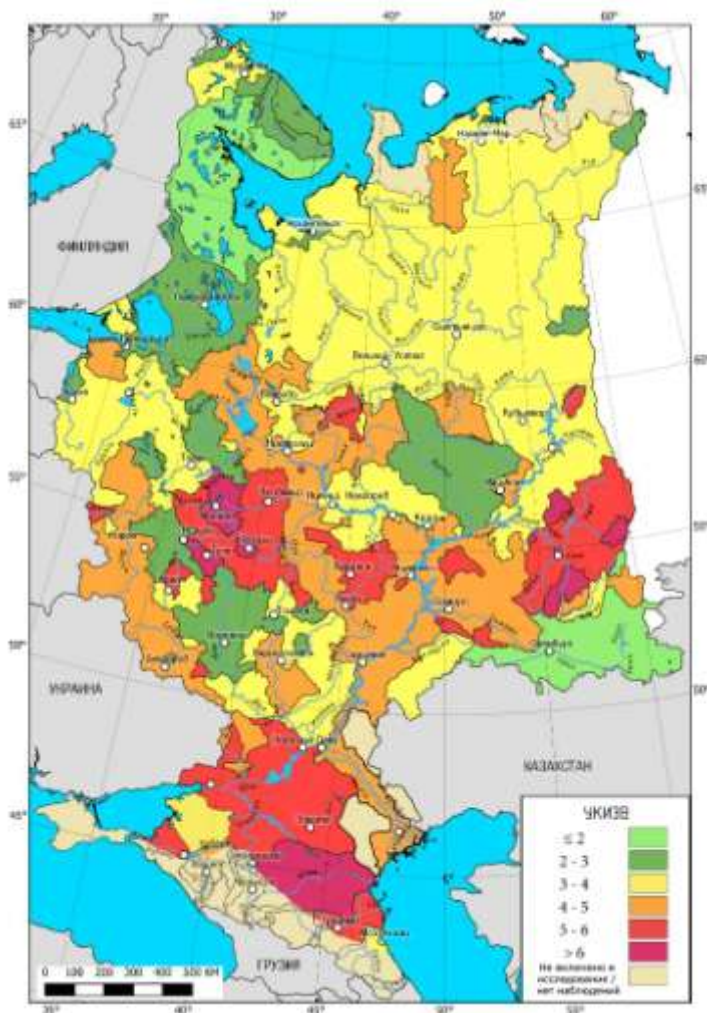
3) в период с 2000 по 2005 год наблюдалось улучшение качества воды рек в пределах зоны тайги в бассейнах рек Мезень, Северная Двина и Онега, в зоне смешанных и широколиственных лесов – в бассейне Камы (рис. 7);

4) с 2005 по 2010 год сохранялись тенденции улучшения качества воды в северных районах ЕЧР (реки Карелии и Кольского полуострова) и в бассейнах отдельных притоков Камы (рр. Уфа и Белая), вместе с этим было отмечено повышение степени загрязненности воды на участках рек в бассейнах Онеги, Мезени, Нижнего Дона и притоке Камы – р. Вятка (рис. 7 и 8);

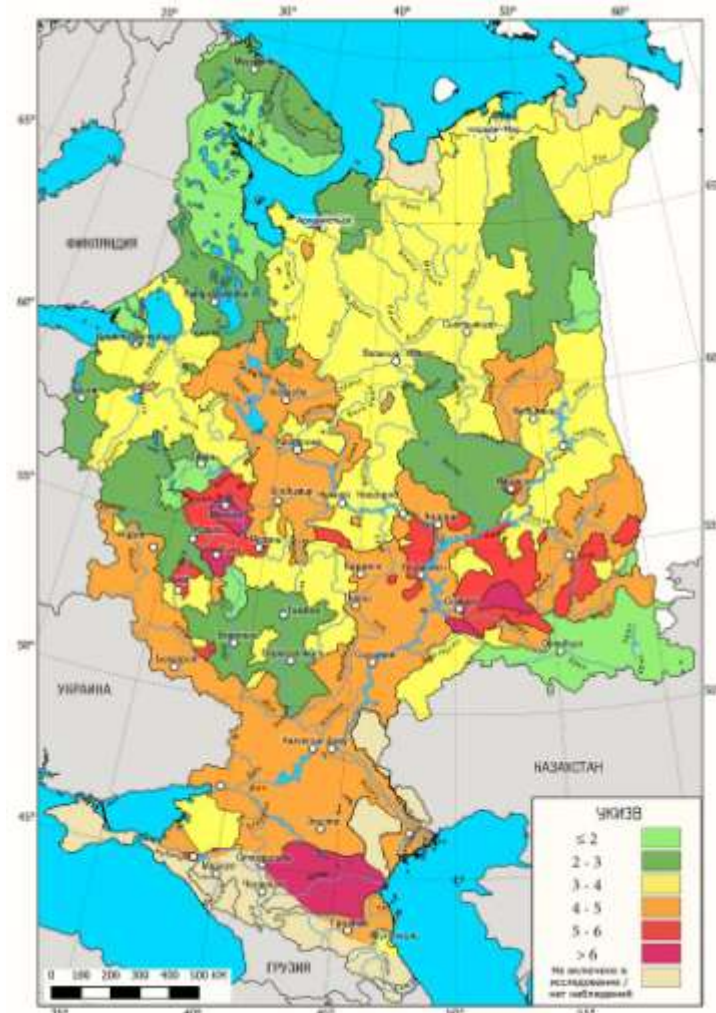
5) в период с 2010 по 2015 год наблюдалось улучшение качества воды рек в пределах зон лесостепей и степей (бассейны рек Нижнего Дона и др.) на фоне незначительного снижения качества воды в зоне тайги в бассейнах рек Верхней Волги и на устьевом участке Печоры, в зоне смешанных и широколиственных лесов – в бассейне Камы (рис. 8).

Таким образом, в целом в пространственно-временной изменчивости качества воды наблюдались разнонаправленные тенденции с преобладанием улучшения качества речных вод ЕЧР и снижения степени их загрязненности.

а)



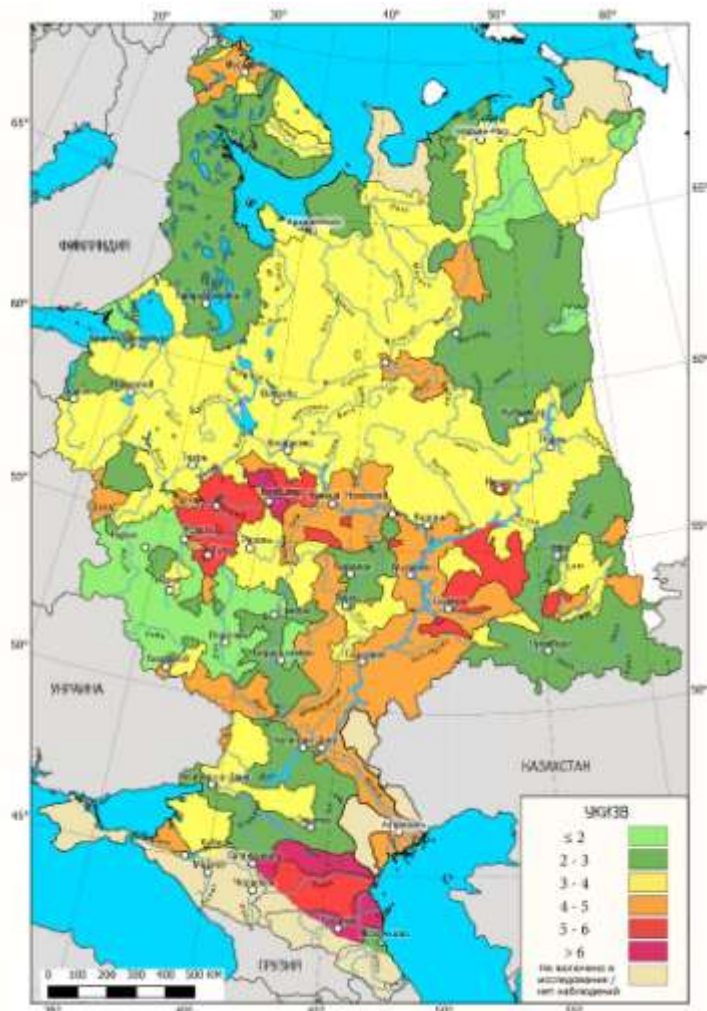
б)



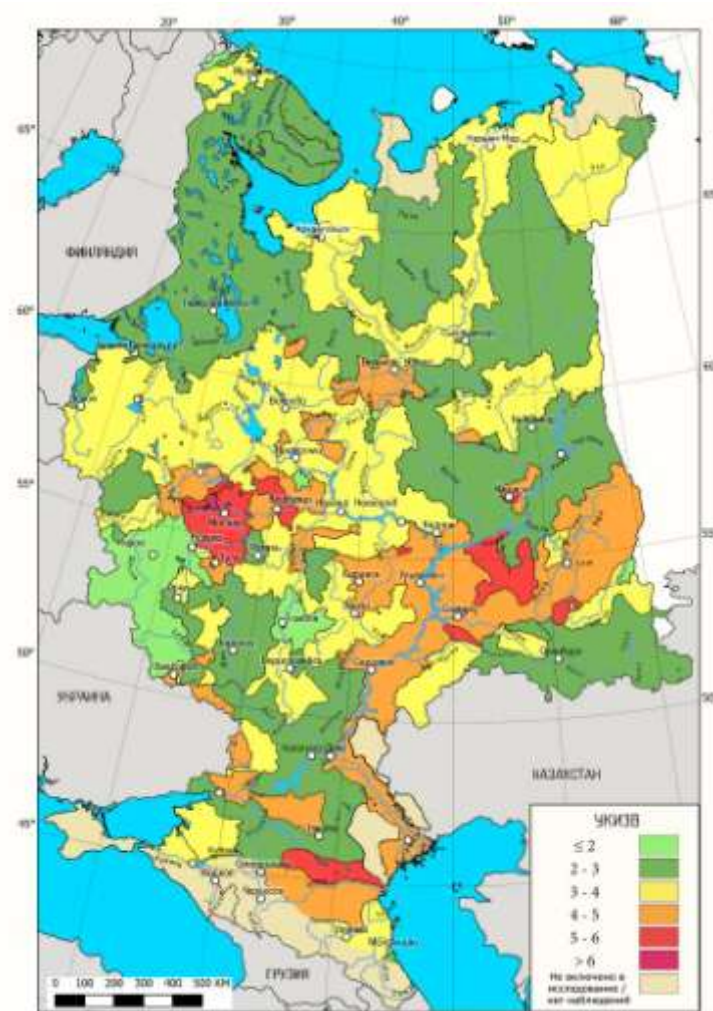
(Обозначения: значения УКИЗВ менее 2,0 соответствуют 2 классу качества («слабо загрязненная» вода), в интервале (2; 3] – 3 классу, разряд 3 «а», «загрязненная»; (3; 4] – 3 классу, разряд 3 «б», «очень загрязненная»; (4; 8] – 4 классу, разряд «а», «б» «грязная»)

Рисунок 6 – Изменчивость значений УКИЗВ и качества речных вод ЕЧР в 1990 (а) и 1995 (б) году

а)



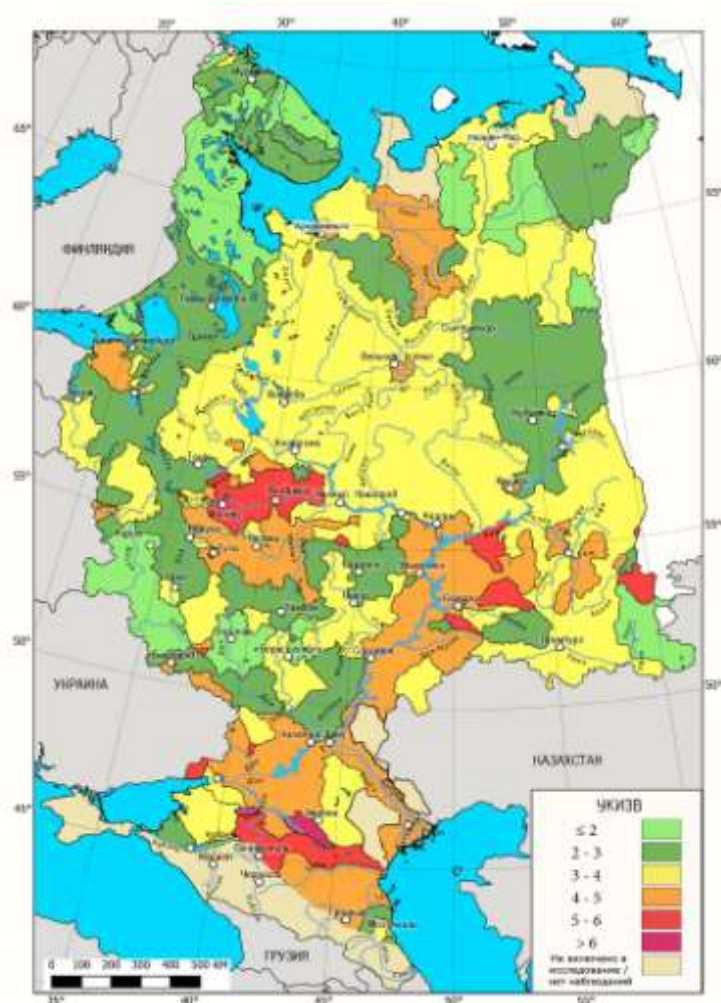
б)



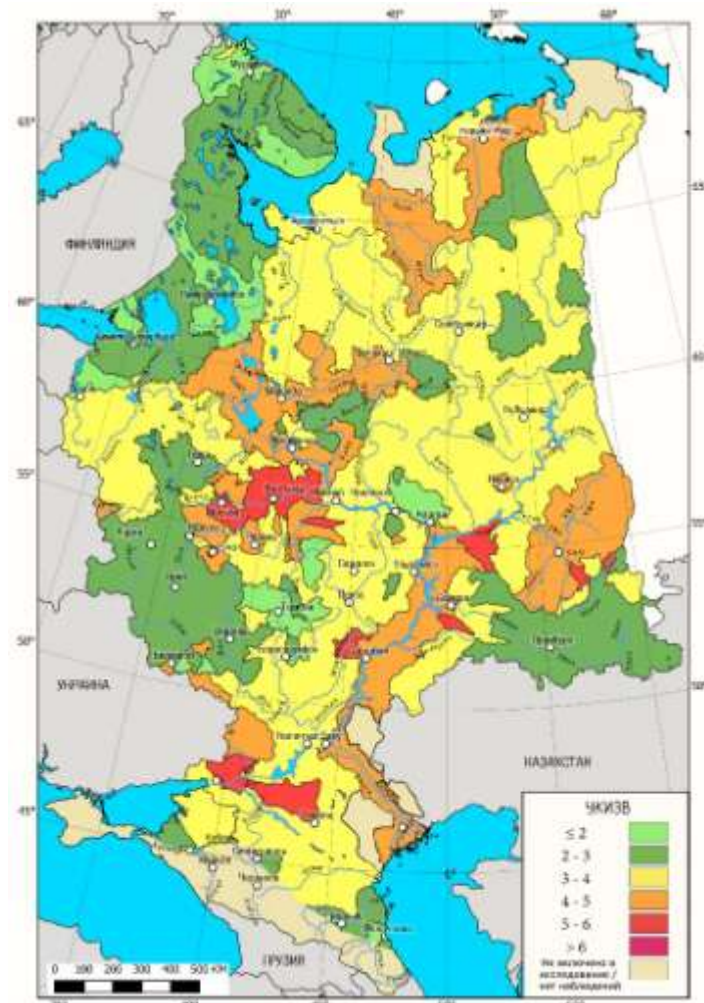
(Обозначения: значения УКИЗВ менее 2,0 соответствуют 2 классу качества («слабо загрязненная» вода), в интервале (2; 3] – 3 классу, разряд 3 «а», «загрязненная»; (3; 4] – 3 классу, разряд 3 «б», «очень загрязненная»; (4; 8] – 4 классу, разряд «а», «б» «грязная»)

Рисунок 7 – Изменчивость значений УКИЗВ и качества речных вод ЕЧР в 2000 (а) и 2005 (б) году

а)



б)



(Обозначения: значения УКИЗВ менее 2,0 соответствуют 2 классу качества («слабо загрязненная» вода), в интервале (2; 3] – 3 классу, разряд 3 «а», «загрязненная»; (3; 4] – 3 классу, разряд 3 «б», «очень загрязненная»; (4; 8] – 4 классу, разряд «а», «б» «грязная»)

Рисунок 8 – Изменчивость значений УКИЗВ и качества речных вод ЕЧР в 2010 (а) и 2015 (б) году

5. Предложен алгоритм комплексной оценки качества воды и состояния участков рек (или речных систем) с учетом экосистемного подхода, бассейнового принципа и необходимости учета регионального геохимического фона. Впервые для участков рек степной зоны ЕЧР в бассейне Нижнего Дона на основе данных комплексных геохимических и экотоксикологических исследований проведена оценка качества воды и состояния речных систем с учетом региональных особенностей.

Анализ методических подходов к оценке качества воды и состояния водных объектов, используемых в России и за рубежом, показал, что при оценке качества воды по большому числу параметров возникают трудности, связанные с анализом и систематизацией значительных массивов данных. Поэтому в мировой практике широко используются различные обобщенные или комплексные показатели. С позиции экосистемного подхода оценку качества воды и состояния водных объектов рекомендуют проводить с включением комплекса показателей, характеризующих абиотический и биотический компоненты.

В условиях возрастающей антропогенной нагрузки и темпов использования водных ресурсов надежную информацию об экологическом состоянии водных объектов могут дать методы оценки качества вод по гидробиологическим показателям. Биологические методы, характеризующие качество воды как среды обитания гидробионтов, зарекомендовали себя как достаточно информативные, позволяющие дать интегральную оценку влияния комплекса ингредиентов и факторов на сообщества водных организмов (Никаноров, 2005). Задача состоит в том, чтобы на фоне естественных перестроек структуры экосистемы, связанных с явлениями природного характера, выделить наиболее информативные показатели и определить критерии их изменчивости во взаимосвязи с уровнем антропогенного воздействия (Решетняк, 2010).

Проблема оценки качества воды и состояния водных систем, в первую очередь, связана с определением критериев экологического благополучия экосистемы – характеристик состояния гидробиоценозов и значений абиотических параметров экосистемы в целом, которые в данном водном объекте должны сохраняться. Иными словами, должны быть разработаны критерии оценки экологического благополучия для всех типов водных объектов. Трудности при оценке состояния и определении критериев экологического благополучия обусловлены сложностью биологических систем, многообразием внутриводоемных процессов и откликов различных сообществ водных организмов на химическое загрязнение среды их обитания (Никаноров, 2005; Никаноров, Брызгалов, 2006; Reshetnyak, 2016).

В целом, качество воды и состояние водного объекта можно оценить как по гидрохимическим, так и гидробиологическим показателям. С экологической точки зрения, более объективным будет результат биологической оценки, отражающий отклик сообществ гидробионтов на качество водной среды.

Многообразие водных объектов и условий их функционирования вызывает необходимость разработки новых подходов к оценке качества воды и состояния водных объектов с учетом их природных особенностей (с учетом фоновых характеристик). При разработке концептуальной схемы комплексной оценки качества воды и состояния речных систем реализованы следующие этапы:

- выбор различных показателей, описывающих химический состав, качество воды и состояние водной системы;
- определение набора градаций и классов, отражающих качество воды и состояние

участка реки (использована шкала состояния природных систем по степени нарушенности при антропогенном воздействии «естественное – равновесное – напряженное – критическое и катастрофическое» (согласно (Реймерс, 1990)) совместимая со шкалой комплексной оценки качества воды по гидрохимическим показателям);

- нахождение диапазонов изменения показателей соответствующих выбранным классам или грациям (на основе сопряженного анализа гидрохимических и гидробиологических характеристик водных систем в многолетнем аспекте);

- обобщение результатов оценки (суммарная бальная оценка) для классификации состояния водных объектов (участков рек), оценки качества речных вод, районирования территории речного бассейна по различным показателям и т.п.

Обоснование выбора интегральных показателей для оценки качества воды и состояния участков рек достаточно сложная проблема. В качестве интегральных гидрохимических показателей согласно Р 52.24.776–2012 предлагается использование таких показателей, как содержание азота аммонийного и легкоокисляемых органических веществ (ЛОВ) по показателю биохимическое потребление кислорода (БПК₅). Эти параметры отражают всю совокупность внутриводоемных процессов и взаимосвязаны с уровнем антропогенной нагрузки на систему.

Ранее была показана важность разработки региональных критериев оценки качества воды и состояния водных экосистем (Никаноров и др., 2013, 2014; Решетняк, 2015), в которой биологическая оценка должна быть определяющей. Экологическое состояние речных систем, испытывающих сильное антропогенное воздействие, изменяется за счет усиления процессов экологического регресса (РД 52.24.633–2002). В зависимости от степени загрязненности водной среды состояние участков рек меняется по показателям развития бактерио-, фито- и зоопланктона, макрозообентоса от «антропогенного напряжения» до «экологического регресса» (РД 52.24.633–2002). Именно поэтому при оценке изменчивости состояния водных экосистем гидробиологические показатели имеют очевидное преимущество, так как являются «интегрирующими» показателями всех изменений за продолжительный период и отражают последствия антропогенного воздействия.

С учетом всего выше сказанного, в концептуальную схему комплексной оценки качества воды и состояния участков рек включены:

- гидрохимические показатели: основные показатели качества воды, используемые при расчетах УКИЗВ и оценке степени загрязненности воды, и интегральные гидрохимические показатели (содержание азота аммонийного и ЛОВ (по БПК₅)), отражающие состояние абиотической компоненты водной системы;

- гидробиологические показатели: общая численность бактериопланктона, фитопланктона и макрозообентоса относительная численность группы олигохет в составе бентоса, число видов фитопланктона;

- геохимический показатель: суммарный показатель загрязненности донных отложений (Z_c), характеризующий не только состояние донных отложений, но и уровень загрязненности водной среды (Саэт, Янин и др., 1990);

- экотоксикологический показатель: показатель степени токсичности воды и/или донных отложений, характеризующий общее токсическое воздействие загрязняющих веществ на гидробионты (Бакаева, Никаноров, 2016).

В зависимости от конкретных задач исследования и имеющихся данных перечень используемых показателей для комплексной оценки может варьироваться.

В основу комплексной оценки качества воды и состояния речных участков положены принципы балльной оценки (по отдельным показателям) и принцип комплексности. При этом оценка должна проводиться с учетом трех положений (Экологический ат-

лас..., 2000):

- показатели качества воды и состояния водных объектов должны быть, с одной стороны, типичными для всех исследуемых водных объектов (участков рек, водоемов, водотоков и т.п.) вне зависимости от их географического положения, а с другой – отражать эффект воздействия неблагоприятных факторов;
- все этапы оценки по отдельным показателям (гидрохимическим, гидробиологическим, геохимическим и токсикологическим) должны быть проведены на основе единого подхода – балльной оценки;
- при прочих равных условиях более напряженным в экологическом отношении будет считаться водная система (водный объект, участок реки и т.п.), где отмечается более худшее качество воды по состоянию биоценозов (по гидробиологическим показателям).

Концептуальная схема (алгоритм) проведения комплексной оценки качества воды и состояния водной среды участка реки (или речного бассейна) по комплексу показателей представлена на рис. 9.



Обозначения на схеме: УКИЗВ – удельный комбинаторный индекс загрязненности воды, ИС – индекс сапробности (по фито- или зоопланктону), БИ – биотический индекс (по макрозообентосу), ДО – донные отложения, ЗВ – загрязняющие вещества

Рисунок 9 – Концептуальная блок-схема проведения комплексной оценки качества воды и состояния водной среды участка реки (или речного бассейна)

В зависимости от целей и задач исследования комплексная оценка качества воды и состояния речной системы может быть проведена как для отдельного участка реки, так и для нескольких участков рек в пределах бассейна (с учетом бассейнового принципа). Обобщение результатов оценки для отдельных участков рек в пределах речного бассейна позволяет оценить его состояние с точки зрения качества воды по гидрохимическим и гидробиологическим показателям, уровня загрязненности воды и донных отложений, токсичности и других характеристик (реализация экосистемного подхода).

Алгоритм комплексной оценки качества воды и состояния водной среды речных участков с учетом региональных особенностей

1. *Балльная оценка качества воды и состояния водной среды участков рек по гидрохимическим показателям*

Оценка качества воды на участках рек может быть выполнена по основным гидрохимическим показателям с использованием традиционной комплексной методики (согласно РД 52.24.643–2002) или по интегральным гидрохимическим показателям (согласно Р 52.24.661–2002; Р 52.24.776–2012) – по содержанию азота аммонийного и концентрации легкоокисляемых органических веществ (ЛОВ по БПК₅), отражающим совокупность протекающих в водной системе физико-химических и химико-биологических внутриводоёмных процессов и взаимосвязанным с антропогенной нагрузкой.

Шкала оценки качества воды традиционно состоит из пяти классов от I-го («условно чистых» вод) до V-го («экстремально грязных»). Каждому классу качества поставлена в соответствие категория состояния системы от «естественного» до «катастрофического» состояния. Классификатор оценки качества воды и состояния речных участков по гидрохимическим показателям приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Классификатор оценки качества воды и состояния речных участков по гидрохимическим показателям (Р 52.24.661–2002; Р 52.24.776–2012)

Класс качества воды	Состояние водной среды	Модальный интервал значений* концентраций	
		ЛОВ по БПК ₅ , мг/дм ³ O ₂	аммонийного азота, мг/ дм ³
I	Естественное	0,50-1,00	менее 0,10
II	Равновесное	1,01-2,00	0,11- 0,40
III	Напряженное	2,01-4,00	0,41 до 1,00
IV	Критическое	4,01-7,00	1,10 до 3,00
V	Катастрофическое	свыше 7,00	свыше 3,00
Примечание: *интервал наиболее часто встречаемых значений показателя.			

2. *Балльная оценка качества воды и состояния участков рек по гидробиологическим показателям*

Для оценки качества воды и состояния речных участков по гидробиологическим показателям используются наиболее информативные показатели развития биоценозов – общая численность планктонных и бентосных сообществ, число видов, доля индикаторных видов, наиболее чувствительных к повышению уровня загрязненности водной среды, и др. Каждому классу качества поставлена в соответствие категория состояния экосистемы по уровню экологического регресса от «экологического благополучия» (что соответствует «естественному» состоянию) до «метаболического регресса» (что соответствует градации «катастрофического» состояния системы).

Оценка проводится согласно методическим подходам, приведенным в рекомендациях Р 52.24.661–2004 и Р 52.24.776–2012, и по классификатору оценки качества воды водных объектов по гидробиологическим показателям (ГОСТ 17.1.3.07-82).

3. Балльная оценка качества воды и состояния участков рек по состоянию донных отложений (по геохимическим показателям)

Оценка качества воды, уровня загрязненности воды и донных отложений (ДО), состояния речных участков по геохимическим показателям проводится по широко используемому в России суммарному показателю загрязнения (Z_c) (Саэт и др., 1990; Янин, 2018). Для этого необходимо рассчитать суммарный показатель загрязнения ДО (Z_c) по отношению к фоновым характеристикам и аналогично суммарный показатель загрязнения для речных вод ($Z_{c \text{ вода}}$) (Закруткин и др., 2020). Полученные значения сопоставляются с критериями, представленными в таблице 11.

Таблица 11 – Шкала оценки качества воды и состояния речных участков по уровню загрязненности воды и донных отложений (составлено по (Закруткин, Решетняк, Бакаева, 2020))

Класс качества	Уровень загрязнения (Янин, 2018)	Суммарный показатель загрязнения (Z_c)		Состояние участка реки
		ДО	водной среды	
I	Слабый	Менее 10,0	Менее 2,0	Естественное
II	Средний	10,1-30,0	2,1-10,0	Равновесное
III	Высокий	30,1-100,0	10,1-30,0	Напряженное
IV	Очень высокий	100,1-300,0	30,1-50,0	Критическое
V	Чрезвычайно высокий	Свыше 300	Свыше 50,0	Катастрофическое

4. Балльная оценка качества воды и состояния участков рек по степени токсичности воды

Биотическая составляющая речных систем является базовой в изучении формирования и восстановления качества вод в условиях антропогенной нагрузки. Только биота может дать ответ о токсичности компонентов водной системы (воды и донных отложений). В настоящее время оценка степени токсичности воды включена в число обязательных показателей систем экологического мониторинга во многих странах (Бакаева, Никаноров, 2015; Закруткин и др., 2020).

Для разработки шкалы интегральной оценки качества вод с учётом степени токсичности и загрязненности водной среды использованы результаты исследований по гранту РНФ № 14-17-00376, выполненного сотрудниками кафедры геоэкологии и прикладной геохимии ЮФУ. Были обследованы более 30 речных участков на 15 реках степной зоны в бассейнах Северского Донца и Тузлова в ходе полевых экспедиционных исследований (2014–2016 гг.). Исследованы участки рек выше и ниже влияния источников загрязнения речных вод – угольных шах и др. объектов угольной отрасли. Были отобраны пробы речных вод на химический, гидробиологический и токсикологический анализ, а также донные отложения – на геохимический и токсикологический анализ.

Для оценки степени токсичности поверхностных вод и донных отложений исследуемых рек д.б.н. Е.Н. Бакаевой выполнены биотестовые анализы на токсичность с использованием как минимуму трёх биотестов (Бакаева, Никаноров, 2015; Закруткин и др., 2020). Сопоставление результатов оценки уровня загрязненности речных вод и ДО по геохимическим показателям (согласно п. 3) и степени токсичности воды позволило раз-

работать шкалу комплексной оценки состояния и качества воды по этим показателям (Закруткин и др., 2020). Критерии оценки качества воды и состояния речных участков по степени токсичности речных вод приведены в таблице 12.

Таблица 12 – Шкала оценки качества воды и состояния речных участков по степени токсичности воды (составлено по (Закруткин, Решетняк, Бакаева, 2020))

Класс качества	Степень токсичности воды по трем биотестам	Качество воды	Состояние участка реки
I	условно нетоксичная	очень хорошее	Естественное
II	слабо токсичная	хорошее	Равновесное
III	токсичная	среднее	Напряженное
IV	очень токсичная	плохое	Критическое
V	чрезвычайно токсичная	очень плохое	Катастрофическое

5. Итоговая обобщенная оценка качества воды и состояния речных участков по комплексу показателей

Для итоговой обобщенной оценки качества воды и состояния водной среды участка реки необходимо провести балльную оценку по всем показателям: гидрохимическим, гидробиологическим, геохимическим и токсикологическим. Критерии балльной оценки по отдельным показателям приведены в таблице 13. Далее необходимо рассчитать средний балл и провести итоговую оценку качества воды и состояния участка реки по комплексу показателей согласно критериям, приведенным в таблице 14.

Таблица 13 – Баллы для комплексной оценки качества воды и состояния участка реки

Качество воды	Балл	Степень токсичности воды	Балл
1-й класс качества	1	Условно нетоксичная	1
2-й класс качества	2	Слабо токсичная	2
3-й класс качества	3	Токсичная	3
4-й класс качества	4	Очень токсичная	4
5-й класс качества	5	Чрезвычайно токсичная	5
Уровень загрязнения речной воды по геохимическим показателям	Балл	Состояние экосистемы по гидробиологическим показателям	Балл
Слабый	1	Естественное	1
Средний	2	Равновесное	2
Высокий	3	Напряженное	3
Очень высокий	4	Критическое	4
Чрезвычайно высокий	5	Катастрофическое	5

Дальнейшее практическое использование полученных результатов оценки качества воды и состояния водного объекта (реки или участка реки) заключается в возможности выявления экологически неблагополучных участков в пределах речного бассейна, в составлении краткосрочного прогноза изменения качества воды, что, в свою очередь, может быть использовано заинтересованными структурами в области водопользования и управления качеством поверхностных вод для обоснования необходимости проведения водоохраных мероприятий и т.п.

Таблица 14 – Шкала итоговой оценки качества воды и состояния водной среды участка реки по комплексу показателей

Средний балл	Качество воды	Состояние водной среды
от 1,0 до 1,5	I – условно чистая	естественное
свыше 1,5 до 2,0	II – слабо загрязненная	равновесное
свыше 2,0 до 3,0	III – загрязненная	напряженное
свыше 3,0 до 4,0	IV – грязная и очень грязная	критическое
свыше 4,0 до 5,0	V – экстремально грязная	катастрофическое

Реализация предлагаемого алгоритма комплексной оценки качества речных вод и состояния участков рек ЕЧР (на примере Кольского полуострова и Нижнего Дона)

1. Для участков рек Кольского полуострова, расположенных в зонах тундры, лесотундры и северной тайги, проведена оценка качества воды и состояния водной среды участков рек по гидрохимическим показателям (согласно п.1) и их классификация по градациям на «естественное», «равновесное» или переходное состояние (таблица 15). Обобщенная оценка по двум гидрохимическим показателям показала, что состояние большинства изученных участков рек Кольского полуострова характеризуется как «естественное» (I-й класс качества, «условно чистая» вода) по интегральным гидрохимическим показателям. В «равновесном» состоянии (II-й класс качества – «слабо загрязненная» водная среда) находятся участки рек Ковдор и Можель в районе г. Ковдор, Ена (п. Ена) и в переходном из «естественного» в «равновесное» – участки рек Печенга, Вите и Нива.

Далее проведена оценка состояния речных экосистем Кольского полуострова по гидробиологическим показателям (согласно п.2) и классификация их состояния по градациям на «равновесное», «напряженное» или переходное состояние (таблица 16). Обобщенная оценка по совокупности гидробиологических показателей показала, что состояние большинства изученных участков рек в зонах тундры и лесотундры характеризуется как «напряженное» (3-й класс качества – «загрязненная» водная среда), а в зоне тайги – как «равновесное» или переходное из равновесного состояния (2-й класс качества – «слабо загрязненная» водная среда).

Такое различие в состоянии и качестве речных вод обусловлено более суровыми природно-климатическими условиями функционирования биоценозов в речных водах зон тундры и лесотундры. За счет низких температур воды, низкого содержания питательных веществ сформированы менее благоприятные условия для развития биоценозов в тундровых ландшафтах, что и обуславливает меньшее видовое разнообразие (т.е. состояние с «элементами экологического регресса») (Никаноров и др., 2010, 2012).

На этапе комплексной оценки проведено обобщение результатов и дана итоговая оценка качества воды и состояния участков рек Кольского полуострова (согласно п.5) по комплексу гидрохимических и гидробиологических показателей (таблица 17).

Состояние большинства изученных участков рек по комплексу показателей характеризуется как «равновесное» (в 83 % случаях в зонах тундры и лесотундры и в 71 % случаях в зоне тайги). С экологической точки зрения наиболее неблагоприятная ситуация сложилась на участках рек Можель и Ковдор в районе города Ковдор.

Таблица 15 – Балльная оценка качества воды и состояния участков рек Кольского полуострова по интегральным гидрохимическим показателям

Река	Пункт наблюдений	Условный балл по		Средний балл	Состояние водной среды (класс качества воды)
		ЛОВ, мг/дм ³ O ₂	N(NH ₄ ⁺), мг/дм ³		
Зоны тундры и лесотундры					
Ура	с. Ура-Губа	1	1	1	естественное (I)
Печенга	ст. Печенга	2	1	1,5	переходное из «естественного» в «равновесное»
Лотта	устье	1	1	1	естественное (I)
Териберка	60 км Серебрянской автодороги	1	1	1	естественное (I)
Патсойоки	Борисоглебская ГЭС	1	1	1	естественное (I)
	пгт Кайтакоски	1	1	1	естественное (I)
Зона тайги					
Можель	г. Ковдор	2	2	2	равновесное (II)
Бува	устье	1	1	1	естественное (I)
Нота	устье	1	1	1	естественное (I)
Вите	устье	2	1	1,5	переходное из «естественного» в «равновесное»
Нива	г. Кандалакша	2	1	1,5	
Ена	п. Ена	2	2	2	равновесное (II)
Ковдора	г. Ковдор	2	2	2	равновесное (II)

Таблица 16 – Балльная оценка качества воды и состояния участков рек Кольского полуострова по совокупности гидробиологических показателей

Река	Пункт наблюдений	Качество воды по показателю					Средний балл	Состояние участка реки (класс качества воды)
		численность бактериопланктона общая млн. кл/дм ³	фитопланктона		макрозообентоса			
			численность, тыс. кл/дм ³	число видов	численность, тыс. экз/м ²	доля олигохет, %		
Зоны тундры и лесотундры								
Ура	с. Ура-Губа	II	IV	IV	IV	II	3,2	напряженное (III)
Печенга	ст. Печенга	II	III	III	III	IV	3,0	напряженное (III)
Лотта	устье	II	IV	IV	II	II	2,8	напряженное (III)
Териберка	60 км Серебрянской автодороги	II	III	III	II	II	2,4	равновесное (II)
Патсо-йоки	Борисоглебская ГЭС	II	III	IV	II	II	2,6	переходное* (II–III)
	пгт Кайта-коски	II	IV	IV	II	II	2,8	напряженное (III)
Зона тайги								
Можель	г.Ковдор	II	III	IV	II	IV	3,0	напряженное (III)
Вува	устье	II	IV	III	II	II	2,6	переходное* (II–III)
Нота	устье	II	IV	III	II	II	2,6	переходное* (II–III)
Вите	устье	II	IV	IV	II	II	2,8	напряженное (III)
Нива	г. Кандалакша	II	III	III	II	II	2,4	равновесное (II)
Ена	п. Ена	II	III	III	II	II	2,4	равновесное (II)
Ковдора	г. Ковдор	II	IV	IV	II	II	2,8	напряженное (III)
Примечание: *переходное состояние из «равновесного» в «напряженное» (средний балл около 2,5) – качество воды II–III класс.								

Таблица 17 – Итоговая балльная оценка качества речных вод и состояния участков рек Кольского полуострова по комплексу показателей

Река	Пункт наблюдений	Средний балл по показателям		Общий средний балл	Состояние (класс качества воды)
		гидро-химическим	гидро-биологическим		
Зоны тундры и лесотундры					
Ура	с. Ура-Губа	1	3,2	2,1	равновесное (II)
Печенга	ст. Печенга	1,5	3,0	2,25	равновесное (II)
Лотта	устье	1	2,8	1,9	равновесное (II)
Териберка	60 км Серебрянской автодороги	1	2,4	1,6	переходное* (I–II)
Патсо-йоки	Борисоглебская ГЭС	1	2,6	1,8	равновесное (II)
	пгт Кайтакоски	1	2,8	1,9	равновесное (II)
Зона тайги					
Можель	г. Ковдор	2	3,0	2,5	переходное** (II–III)
Вува	устье	1	2,6	1,8	равновесное (II)
Нота	устье	1	2,6	1,8	равновесное (II)
Вите	устье	1,5	2,8	2,15	равновесное (II)
Нива	г. Кандалакша	1,5	2,4	1,95	равновесное (II)
Ена	п. Ена	2	2,4	2,2	равновесное (II)
Ковдора	г. Ковдор	2	2,8	2,4	переходное** (II–III)
Примечания: *переходное состояние из «естественного» в «равновесное» (средний балл около 1,5) – качество воды I–II класса; **переходное состояние из «равновесного» в «напряженное» (средний балл около 2,5) – качество воды II–III класса.					

2. Для участков рек степной зоны – на примере рек бассейна Нижнего Дона (притоков Северского Донца и Тузлова) выполнена по такой же методологической схеме комплексная оценка качества воды и состояния участков рек **по совокупности геохимических и экотоксикологических показателей.**

Проведена балльная покомпонентная оценка уровня загрязненности воды и донных отложений относительно фоновых характеристик, оценка степени токсичности донных отложений и рассчитан средний балл. Результаты комплексной оценки показали, что в бассейне Тузлова большинство участков рек (61,5 %) функционируют в «напряженном» состоянии (класс качества воды - III), а в бассейне Северского Донца (60 %) – в «равновесном» (класс качества воды - II), что согласуется с различиями в уровнях антропогенной нагрузки на водосборах рек (таблица 18).

В бассейне Тузлова сконцентрировано наибольшее количество источников загрязнения речных вод – действующих и ликвидированных объектов угольной отрасли в Ростовской области (угольных шахт, угольных отвалов и др. источников загрязнения) (рис. 10).

Таблица 18 – Итоговая балльная оценка качества речных вод и состояния участков рек Нижнего Дона по комплексу показателей

Река	Тип створа*	Балл по уровню загрязненности		Балл по токсичности донных отложений**	Средний балл	Состояние участков рек (класс качества воды)
		воды	донных отложений			
Бассейн Северского Донца						
Большая Каменка	уст.	3	1	1	1,67	равновесное (II)
Большая Гнилуша	ниж.	4	1	2	2,33	напряженное (III)
	уст.	4	2	2	2,67	напряженное (III)
Быстрая	уст.	2	1	1	1,33	естественное (I)
Калитва	уст.	2	1	1	1,33	естественное (I)
Кундрючья	ниж.	4	1	2	2,33	напряженное (III)
	уст.	3	1	2	2,00	равновесное (II)
Лихая	верх.	3	2	1	2,00	равновесное (II)
	ниж.	3	1	1	1,67	равновесное (II)
	уст.	3	1	2	2,00	равновесное (II)
Малая Каменка	верх.	2	1	2	1,67	равновесное (II)
	ниж.	3	1	1	1,67	равновесное (II)
	уст.	2	1	1	1,33	естественное (I)
Северский Донец	ниж.	2	1	2	1,67	равновесное (II)
	уст.	3	1	–	2,00	равновесное (II)
Бассейн Тузлова						
Аюта	верх.	4	2	1	2,33	напряженное (III)
	ниж.	4	1	1	2,00	равновесное (II)
	уст.	4	1	2	2,33	напряженное (III)
Большой Несветай	ниж.	3	1	1	1,67	равновесное (II)
	уст.	4	1	–	2,50	напряженное (III)
Грушевка	верх.	3	1	2	2,00	равновесное (II)
	ниж.	3	2	2	2,33	напряженное (III)
	уст.	3	1	1	1,67	равновесное (II)
Малый Несветай	верх.	4	2	1	2,33	напряженное (III)
	ниж.	4	1	2	2,33	напряженное (III)
	уст.	4	1	2	2,33	напряженное (III)
Тузлов	уст.	3	1	2	2,00	равновесное (II)
Атюхта	уст.	5	1	2	2,67	напряженное (III)
Примечания: *тип створа: (верх. – верхний) и (ниж. – нижний) – это створы на участке реки выше или ниже сброса шахтных вод, (уст. – устьевой) – створ в устье реки; **неизмененные (нативные) пробы донных отложений (Закруткин и др., 2016).						

Оценка уровней загрязненности речных вод и донных отложений по отношению к фоновым характеристикам показала, что уровень загрязненности воды несколько выше, чем донных отложений. Сравнение результатов оценки для двух бассейнов показывает, что состояние речных участков в бассейне Северского Донца более благополучное. Наблюдается совпадение результатов токсикологических и геохимических оценок для большинства участков исследуемых рек степной зоны.

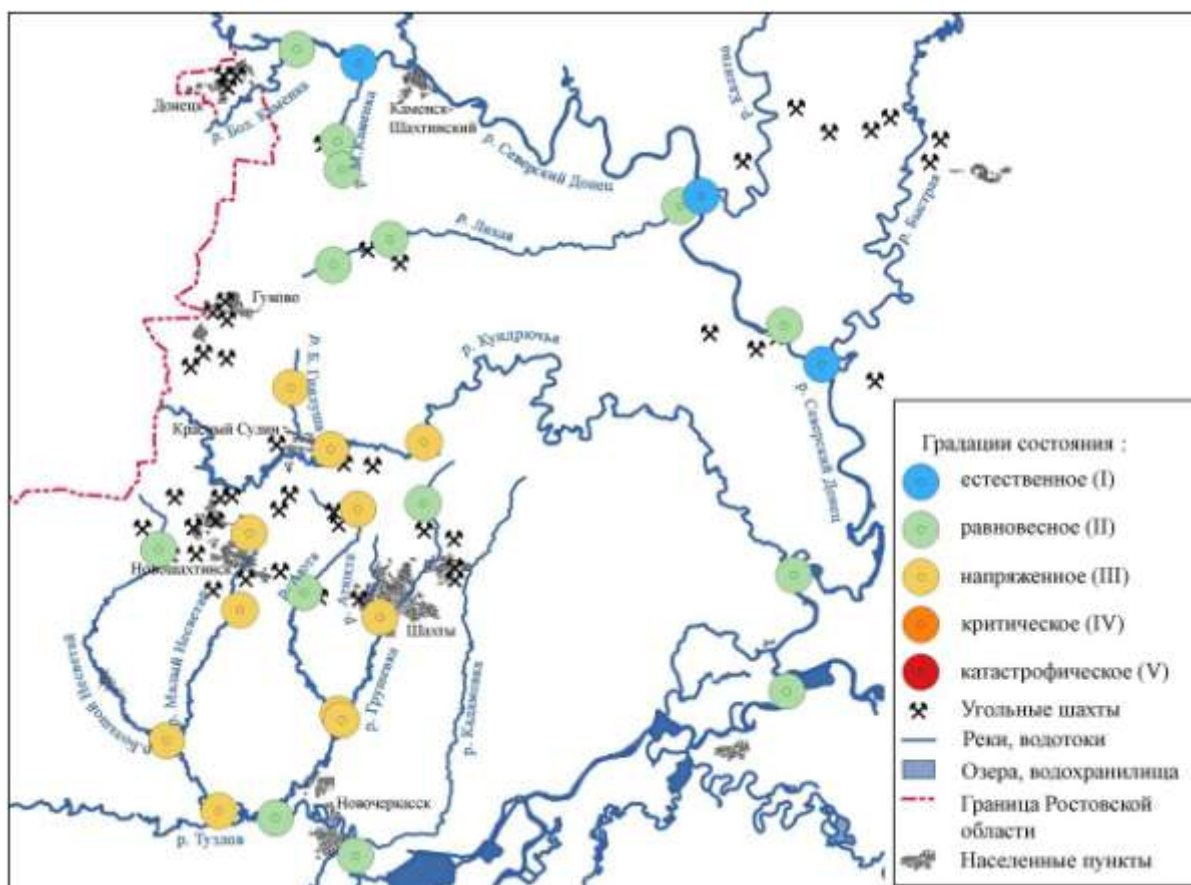


Рисунок 10 – Картосхема пространственной изменчивости состояния участков рек в бассейне Нижнего Дона по комплексу показателей (составлено автором)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований сформулированы следующие выводы по пространственно-временной изменчивости химического состава и качества речных вод, о распределении гидрохимических аномалий и тенденциях изменения химического состава воды для участков рек различных природных зон ЕЧР.

1. В изменении химического состава воды рек европейской части России наблюдается гидрохимическая зональность, поскольку распределение химических веществ в природных водах определяется природно-климатическими условиями и зональными особенностями ландшафтов. Существует тенденция к увеличению с севера на юг и с запада на восток содержания главных ионов и некоторых биогенных веществ и тенденция к снижению содержания соединений железа и цинка. При этом химический состав воды небольших рек лучше отражает климатические условия местности и более полно передает зональность состава воды. С другой стороны, с уменьшением размера бассейна усиливается влияние местных азональных условий (состав почв и пород, гидрогеологические условия, рельеф). Гидрохимическая зональность нарушается для больших рек, бассейны которых охватывают несколько природных зон и химический состав их воды часто отличается от химического состава воды притоков в данной местности (например, река Дон и его южные притоки Северский Донец, Сал, Маныч и др. имеют отличия в составе воды).

2. Нарушение гидрохимической зональности, аazonальные особенности водосборов малых рек и воздействие антропогенных факторов формируют гидрохимические

аномалии (естественного или антропогенного генезиса). Доля выявленных гидрохимических аномалий в речных водах ЕЧР составила всего 5,9 % от общего числа возможных вариантов. По количеству случаев выявленных аномальных значений гидрохимические показатели можно разделить на три группы:

- 1) более 10 % случаев – это SO_4^{2-} (18,4 %) и Ca^{2+} (10,7 %);
- 2) от 5 до 10 % – это Cl^- , NO_3^- , NH_4^+ , Fe, ОВ (по ХПК), Mg^{2+} , HCO_3^- , Cu^{2+} ;
- 3) менее 5 % – это Zn^{2+} , Mn, нефтепродукты и ЛОВ (по БПК₅).

По генезису в речных водах ЕЧР незначительно преобладают аномальные значения концентраций антропогенного типа (53 %), сформированные за счет антропогенных факторов. В направлении с севера на юг наблюдается увеличение доли аномальных значений концентраций, что коррелирует с тенденцией усиления антропогенной нагрузки на ландшафты и на водотоки за счет более развитой промышленности и сельского хозяйства в центральной и южной частях ЕЧР.

Наибольшее количество гидрохимических аномалий выявлено в зонах тайги, смешанных и широколиственных лесов. В пространственном распределении выделяются отдельные территория с преобладанием гидрохимических аномалий антропогенного типа (например Кольский полуостров) или с формированием аномалий преимущественно естественного генезиса (в бассейнах рек в зоне тайги – Северная Двина, реки Карелии и др.).

3. Выявлено, что для большинства речных участков практически во всех физико-географических провинциях ЕЧР медианные значения концентраций превышают установленные нормативы по отдельным показателям качества вод. Это наблюдается по содержанию в воде органических веществ, соединений железа и меди во всех рассмотренных природных зонах, а для цинка – в зонах тундры и лесотундры, зоне тайги и в зоне смешанных и широколиственных лесов.

Во временном аспекте проявляется разнонаправленность тенденций изменчивости концентраций химических веществ в воде рек ЕЧР по большинству показателей. В целом для речных участков меньше всего трендов сформировалось в многолетней динамике изменения концентраций ионов магния, кальция и гидрокарбонатов (менее 50 % случаев), больше всего – для органических веществ и соединений марганца (по 70 %), соединений железа (80 %) и нефтепродуктов (85 %). Большинство из выявленных тенденций имеют убывающую направленность, что будет иметь положительный эффект в изменении качества речных вод ЕЧР.

4. Выявлена пространственно-временная неоднородность речных вод по степени их загрязненности. Большинство исследуемых речных участков ЕЧР по степени загрязненности воды характеризуются как стабильно «загрязненные» и/или «очень загрязненные», что соответствует 3-му классу качества воды. Доля таких речных участков составляет от 30 % (в зонах лесостепей и степей) до 57 % (в зоне тайги). Существенна также доля речных участков, водная среда которых находится в переходном состоянии, когда качество воды меняется в пределах 3-4 классов, и составляет от 19 % (в зоне тайги) до 39 % (в зонах лесостепей и степей).

Наблюдается пространственная неоднородность в пределах ЕЧР степени загрязненности воды рек разных физико-географических провинций как внутри природной зоны, так и между природными зонами. В зональной изменчивости прослеживается общая закономерность возрастания доли участков рек, водная среда которых характеризуется как стабильно «очень загрязненная» или «грязная», при движении с севера на юг. В зонах смешанных и широколиственных лесов, лесостепей и степей высока доля речных участков, вода которых имеет стабильно высокую степень загрязненности – категории

«грязная» и/или «очень грязная».

Временная динамика качества речных вод ЕЧР за период с 1990 по 2015 гг. проявляется в тенденциях к стабилизации или снижению степени ее загрязненности для большинства участков рек во все природных зонах ЕЧР, что положительно повлияет на качество воды в сторону его улучшения в будущем.

5. Сформулированы научно-методические подходы к комплексной оценке качества речных вод и состояния участков рек на основе анализа существующих подходов и с использованием бассейнового принципа и экосистемного подхода. Предлагается рассматривать и оценивать качество воды и состояние участка реки по комплексу показателей биотической и абиотической составляющих водной системы (по совокупности состояния биоты, водной среды и донных отложений).

На примере рек степной зоны ЕЧР впервые на основе данных геохимических и экотоксикологических исследований проведена комплексная оценка качества воды и состояния речных участков на основе разработанной шкалы с выделением 5 классов. Оценочная шкала учитывает степень загрязненности воды и донных отложений по отношению к их фоновым характеристикам, состояние гидробиоценозов и степень токсичности водной среды.

6. Реализация предлагаемой комплексной схемы выполнена на примере участков рек Кольского полуострова и Нижнего Дона (рек бассейнов Северского Донца и Тузлова).

Комплексная оценка качества воды и состояния участков рек Кольского полуострова по комплексу гидрохимических и гидробиологических показателей показала, что состояние большинства изученных участков рек характеризуется как «равновесное» (в 83 % случаях в зонах тундры и лесотундры и в 71 % случаях в зоне тайги). С экологической точки зрения наиболее неблагоприятная ситуация сложилась на участках рек Можель и Ковдор в районе города Ковдор.

Комплексная оценка качества воды и состояния речных участков в бассейне Нижнего Дона показала, что в бассейне Тузлова большинство участков рек (61,5%) функционируют в «напряженном» состоянии, а в бассейне Северского Донца (60 %) – в «равновесном», что согласуется с различиями антропогенной нагрузки на речных водосборах.

Результаты исследований показали необходимость использования комплексного экосистемного подхода при оценке качества воды и состояния участков рек. При этом важно сопоставлять состояние всех основных компонентов водной экосистемы – воды, донных отложений и биоты. Результаты комплексной оценки качества воды и состояния участков рек в дальнейшем могут быть использованы в области управления качеством воды, восстановления состояния малых рек, особенно в таких вододефицитных районах, как зона степей на юге ЕЧР.

Оценка природного содержания химических веществ в реках различных природных зон ЕЧР, выявление основных тенденций их изменчивости и гидрохимических аномалий в поверхностных водах имеет важное прикладное значение. В дальнейшем это может быть использовано при решении таких актуальных вопросов, как разработка региональных критериев оценки современного качества воды и состояния водных объектов, выявление участков рек с повышенным или пониженным содержанием отдельных химических веществ, прогнозирование изменения химического состава речных вод и разработка экологически обоснованных водоохраных мероприятий, направленных на сохранение и восстановление естественного функционирования речных систем.

**Список наиболее значимых работ, опубликованных автором
по теме диссертационного исследования:**

в изданиях международных баз данных Web of Science и/или Scopus:

1. Никаноров, А.М. Оценка состояния гидробиоценоза на участках водных объектов Кольского Севера с высокой степенью загрязненности воды соединениями меди и никеля / А.М. Никаноров, Л.П. Соколова, Л.С. Косменко, **О.С. Решетняк** // Метеорология и гидрология. – № 11. – 2009. – С. 69–80.
2. Никаноров, А.М. Антропогенная нагрузка на устьевую область р. Северная Двина / А.М. Никаноров, Л.П. Соколова, **О.С. Решетняк**, М.Ю. Кондакова, А.О. Даниленко // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 4. – С. 75–84.
3. **Reshetnyak, O.S.** The Anthropogenic transformation of the water bodies of the European North of Russia / **O.S. Reshetnyak** // Russian Journal of General Chemistry. – 2010. – Т. 80. – № 13. – Pp. 2738–2753.
4. Никаноров, А.М. Экологически допустимые уровни воздействия на речные экосистемы Арктического региона / А.М. Никаноров, **О.С. Решетняк**, В.А. Брызгало, Л.С. Косменко // Метеорология и гидрология. – 2013 – № 3. – С. 85–93.
5. Nikanorov, A.M. Main approaches to the organization of national system of basic monitoring freshwater ecosystems in the Russian Arctic / A.M. Nikanorov, V.A. Bryzgalo, L.S. Kosmenko, **O.S. Reshetnyak** // Russian Meteorology and Hydrology. – 2013. – Т. 38. – № 6. – Pp. 426–430.
6. **Решетняк, О.С.** Антропогенная трансформация водной экосистемы Нижней Волги / **Решетняк О.С.**, А.М. Никаноров, В.А. Брызгало, Л.С. Косменко // Водные ресурсы, – 2013. – Т. 40. – № 6. – С. 623–632.
7. Никаноров, А.М. Транспорт загрязняющих веществ по крупным рекам Европейского Севера и Сибири / А.М. Никаноров, В.А. Брызгало, **О.С. Решетняк**, М.Ю. Кондакова // Водные ресурсы. – 2015 – Т. 42. – № 3. – С. 279–287.
8. **Reshetnyak, O.S.** Environmental regulation of the chemical pollution in aquatic ecosystem (Biological aspects) / **O.S. Reshetnyak** // Water Resources. – 2016. – Vol. 43. – No. 2. – Pp. 364–368.
9. Никаноров, А.М. Многолетняя изменчивость загрязненности воды и состояния речных экосистем различных широтных зон Европейской части России / А.М. Никаноров, Л.И. Минина, В.А. Брызгало, Л.С. Косменко, М.Ю. Кондакова, **О.С. Решетняк**, А.О. Даниленко // Водные ресурсы. – 2016. – Т. 43. – № 5. – С. 515–527.
10. **Решетняк, О.С.** Оценка гидроэкологического риска в бассейне реки Ока / **О.С. Решетняк**, А.М. Никаноров, М.М. Трофимчук, Ю.С. Гришанова // Вода и экология: проблемы и решения. – 2017. – № 3. – С. 159–171.
11. **Reshetnyak, O.S.** Long-Term Dynamics of the River Water Quality in the Northern Dvina Basin (Northwestern Russia) / **O.S. Reshetnyak**, V.N. Reshetnyak, K.G., Vlasov,

- K.G. Myagkova // Water Resources. – 2018. – Vol. 45(2). – Pp. S93–S98.
12. Dzhamalov, R. G. The Regime of Water and Chemical Runoff in the Upper Volga Basin under Global Warming / R. G. Dzhamalov, **O.S. Reshetnyak**, T.I. Safronova, K.G. Myagkova, K.G. Vlasov // Water Resources. – 2018. – Vol. 45(2). – Pp. S35–S43.
 13. Dzhamalov, R.G. Space–Time Analysis of Hydrochemical Composition and Pollution of Water in the Northern Dvina Basin / R. G. Dzhamalov, A.A. Mironenko, K.G. Myagkova, **O.S. Reshetnyak**, T.I. Safronova // Water Resources. – 2019. – Vol. 46(2). – Pp. 188–198.
 14. Dzhamalov, R.G. The Space and Time Variations of Water Quality and Water Pollution Dynamics in the Oka Basin / R.G. Dzhamalov, K.G. Vlasov, K.G. Myagkova, **O.S. Reshetnyak**, T.I. Safronova // Water Resource. – 2019. – Vol. 46(1). – Pp. S74–S84.
 15. Dzhamalov, R.G. Pollution Degree of the Don River Water / R.G. Dzhamalov, A.E. Kosolapov, K.G. Vlasov, K.G. Myagkova, **O.S. Reshetnyak**, T.I. Safronova // Water Resources. – 2019. – Vol. 46(1). – Pp. S1–S10.
 16. Закруткин, В.Е. Донные отложения как индикатор первичного и источник вторичного загрязнения речных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса / В.Е. Закруткин, Е.В. Гибков, **О.С. Решетняк**, В.Н. Решетняк // Известия РАН. Серия Географическая. – 2020. – Т. 84. – № 2. – С. 259–271.
 17. Закруткин, В.Е. Гидроэкологические особенности поверхностных вод углепромышленных территорий Восточного Донбасса / В.Е. Закруткин, **О.С. Решетняк**, Е.Н. Бакаева // Известия РАН. Серия Географическая. – 2020. – Т. 84. – № 3. – С. 451–460.
 18. Закруткин, В.Е. Донные отложения рек техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: сравнительная оценка уровня загрязнения тяжелыми металлами по отечественным и зарубежным критериям / В.Е. Закруткин, В.Н. Решетняк, **О.С. Решетняк**, Е.В. Гибков // Известия РАН. Серия географическая. – 2021. – Т. 85. – № 4. – С. 554–564.
 19. Babayan, G. A Comparative Assessment of River Water Quality in Mountain Regions of Russia and Armenia / G. Babayan, **O. Reshetnyak**, V. Zakrutkin // Water Resources. – 2021. – Vol. 48. – No. 1. – Pp. 102–110.
 20. Котова, Е.И. Влияние разработки месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова на р. Золотица / Е.И. Котова, О.П. Нецветаева, **О.С. Решетняк** // Арктика: экология и экономика. – 2022. – Т.12. – № 2. – С. 191–199.
 21. Сазонов, А.Д. Временная изменчивость поверхностного гидрохимического стока в бассейне реки Большой Егорлык в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений / А.Д. Сазонов, В.Е. Закруткин, **О.С. Решетняк** // Геология и геофизика Юга России. – 2022. – 12(2). – С. 114–127.
 22. **Решетняк, О.С.** Антропогенная нагрузка по модулю химического стока и качество воды на замыкающих створах рек арктической зоны России / **О.С. Решетняк**, Л.С. Косменко, А.А. Коваленко // Вестник Московского университета. Серия 5. География. – 2022. – № 3. – С.3–17.

23. **Reshetnyak, O.S.** Trends in the Variability of the Chemical Composition and Quality of Water in the Lower Volga Tributaries under Anthropogenic Impact and Climate Change / **O.S. Reshetnyak**, L.S. Kosmenko, and A.O. Danilenko // Russian Meteorology and Hydrology. – 2022. – Vol. 47. – No. 1. – PP. 67–73.
24. **Reshetnyak, O.S.** Long-Term Variations of Mercury Compound Concentrations in River Ecosystems in Russia Based on Monitoring Data / **O.S. Reshetnyak** // Water Resources. – 2022. – Vol. 49(2). – PP. S76–S82.
25. **Решетняк, О.С.** Межгодовая и сезонная изменчивость стока растворенных веществ в дельтовых рукавах реки Кубани / **О.С. Решетняк**, Р.С. Комаров // Вестник Моск. университета. Серия 5. География. – 2023. – № 1. – С. 96–106.
26. **Решетняк, О.С.** Оценка состояния водных экосистем по интегральным гидрохимическим показателям в государственном мониторинге состояния и загрязнения окружающей среды / **О.С. Решетняк**, А.О. Даниленко, М.Ю. Кондакова, Л.С. Косменко // Метеорология и гидрология. – 2023. – № 5. – С. 53–63.
27. **Решетняк, О.С.** Анализ вероятности метаморфизации ионного состава ультрапресных вод арктических рек России / **О.С. Решетняк** // Арктика: экология и экономика. – 2023. – Т. 14. – № 3. – С.446–457.
28. **Reshetnyak O.S.** Hydrochemical Anomalies in Rivers in Murmansk Region / **O.S. Reshetnyak** // Water Resources, 2024. – Vol. 51, No. 3. – Pp. 258–266.

в изданиях, рекомендованных ВАК (в области 01.06.00 Науки о Земле и окружающей среде и по специальности 1.6.21. Геоэкология):

1. Никаноров, А.М. Антропогенная трансформация экологического состояния и транспорт загрязняющих веществ по длине реки Кубани / А.М. Никаноров, В.А. Брызгалов, **О.С. Решетняк**, Л.С. Косменко, М.Ю. Кондакова // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2013. – № 2. – С. 108–118.
2. Закруткин, В.Е. Сравнительная оценка качества поверхностных и подземных вод Восточного Донбасса по гидрохимическим показателям / В.Е. Закруткин, Е.В. Гибков, Г.Ю. Скляренок, **О.С. Решетняк** // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2016. – № 2. – С. 91–99.
3. **Решетняк, О.С.** Донные отложения как источник вторичного загрязнения речных вод металлами (по данным лабораторного эксперимента) / **О.С. Решетняк**, В.Е. Закруткин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2016. – № 4. – С.102–109.
4. **Решетняк, О.С.** Многолетняя изменчивость содержания соединений кадмия и свинца в речных экосистемах России / **О.С. Решетняк**, В.А. Брызгалов, Л.С. Косменко // География и природные ресурсы. – 2017. – № 1. – С. 71–80.
5. Закруткин, В.Е. Современный химический состав и тенденции пространственно-временной изменчивости качества речных вод Восточного Донбасса / В.Е. Закруткин, **О.С. Решетняк**, Г.Г. Бабаян, Е.В. Гибков, Г.А. Саакян, В.Н. Решетняк // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский

- регион. Естественные науки. – 2017. – № 2. – С. 101–109.
6. Джамалов, Р.Г. Воды бассейна Оки: химический состав и источники загрязнения / Р.Г. Джамалов, А.М. Никаноров, **О.С. Решетняк**, Т.И. Сафронова // Вода и экология: проблемы и решения. – 2017. – № 3. – С.114–132.
 7. Закруткин, В.Е. Влияние угледобычи в Донбассе на подземные и поверхностные воды / В.Е. Закруткин, А.Р. Зубов, Г.Ю. Складенко, Л.Г. Зубова, **О.С. Решетняк** // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2017. – № 3-1. – С. 100–105.
 8. Закруткин, В.Е. Угледобывающие районы как очаг экологической напряженности / В.Е. Закруткин, Е.В. Гибков, Г.Ю. Складенко, **О.С. Решетняк** // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2018. – № 2 (198). – С. 75–83.
 9. **Решетняк, О.С.** Тенденции изменчивости химического состава речных вод Европейской части арктической зоны России / **О.С. Решетняк**, М.Ю. Кондакова, А.О. Даниленко, Л.С. Косменко, В.Н. Решетняк // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2019. – № 1. – С. 86-94.
 10. Васта, Хемн Комплексная оценка современного состояния речных экосистем в бассейне Северского Донца (в пределах Ростовской области) / Хемн Васта, **О.С. Решетняк**, В.Е. Закруткин // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2019. – № 2 (202). – С. 47–54.
 11. Zakrutkin, V.E. Assessment of the heavy metal pollution level of river sediments of the Eastern Donbass (Rostov Region, Russia) / V.E. Zakrutkin, V.N. Reshetnyak, **O.S. Reshetnyak** // Water and Ecology. – 2020. – № 3 (83). – Pp. 32–40.
 12. **Решетняк, О.С.** Оценка уровня экологического риска в речных экосистемах арктической зоны России / **О.С. Решетняк** // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – 2020. – № 3. – С. 69–78.
 13. **Решетняк, О.С.** Тенденции изменчивости химического состава и степени загрязненности воды реки Кубань / **О.С. Решетняк**, Р.С. Комаров // Вода и экология: проблемы и решения. – 2021. – № 1 (85). – С. 30–40.
 14. Джамалов, Р.Г. Масштаб и многолетняя динамика загрязнения бассейна Оки / Р.Г. Джамалов, К.Г. Власов, В.Ю. Григорьев, К.Г. Галагур, **О.С. Решетняк**, Т.И. Сафронова // Вода и экология: проблемы и решения. – 2021. – № 2 (86). – С. 40–53.
 15. Комаров, Р.С. Комплексная оценка качества воды притоков реки Кубани / Р.С. Комаров, **О.С. Решетняк** // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2023. – Т. 8. – №1 (31). – С. 24–30.
 16. **Решетняк, О.С.** Многолетняя изменчивость химического состава и качества воды в бассейне реки Дон / **О.С. Решетняк** // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2023. – Т. 8. – №1 (31). – С. 51–59.