ЭКОСИСТЕМЫ: ЭКОЛОГИЯ И ДИНАМИКА, 2025, том 9, № 4, с. 63-104

МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ, ПОДДЕРЖАНИЯ И СОХРАНЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

УДК 502.175

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА КОМПОНЕНТОВ ВОДНОЙ ЭКОСИСТЕМЫ МАЛОЙ РЕКИ ХОДЦА В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ ПРИ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКЕ

© 2025 г. С.П. Замана*, В.М. Зубкова, Ж.С. Макаханюк***

**Государственный университет по землеустройству*
Россия, 105064, Москва, ул. Казакова, д. 15. E-mail: svetlana.zamana@gmail.com
***Российский государственный социальный университет*
Россия, 129226, Москва, ул. Вильгельма Пика, д. 4, стр. 1

Поступила в редакцию 10.10.2025. После доработки 10.11.2025. Принята к публикации 01.12.2025.

В настоящее время малые реки испытывают сильное техногенное воздействие, особенно в регионах с большим количеством промышленных предприятий и высокой плотностью населения. Негативные изменения претерпевают как абиотические, так и биотические компоненты рек. Поэтому геоэкологическая оценка компонентов водной экосистемы малой реки Ходца в Московской области (исток – г. Электросталь, устье – г. Павловский Посад) является актуальной задачей. При проведении исследований решались следующие задачи: определение загрязняющих веществ в воде, снеге, береговом грунте, донных отложениях, высшей водной растительности, рыбе; оценка биоиндикаторов, биопродуктивности высшей водной растительности и зон экологического риска на разных участках реки.

В основу работы положены материалы как полевых исследований, проведенных с 2017 по 2023 годы на различных участках реки, так и лабораторных. Общая методика работ включала отбор проб воды, снега, берегового грунта, донных отложений и растений в 3 местах: исток, промежуточная точка, устье. Для анализа проб использовали общепринятые методики, внесенные в Реестр количественного химического анализа. В настоящее время в основном на риск ухудшения экологической ситуации экосистемы количественно указывает уровень превышения содержания загрязняющего вещества над установленным для этого вещества нормативом (ПДК, МДУ и т.д.) в конкретном компоненте экосистемы, однако при решении экологических проблем, связанных с химическим загрязнением, важно учитывать реакцию живых организмов на загрязнение с помощью биоиндикации и биотестирования. Поскольку в водной экосистеме абиотические компоненты (вода, донные отложения, береговой грунт) определяют важнейшие процессы, от которых зависит функционирование биотических компонентов, т.е. всех живых организмов, то мы применили экосистемный подход, основанный на комплексном количественном исследовании миграции приоритетных токсичных химических элементов во всех звеньях биогеохимической пищевой цепи водной экосистемы р. Ходца.

В результате исследований выявлены закономерности миграции тяжелых металлов в системе «вода – донные отложения – береговой грунт – растения – рыбы». В воде в разных местах опробования по течению реки среди загрязняющих веществ преобладали железо, кадмий, свинец, аммонийный азот и нефтепродукты. По сравнению с береговым грунтом донные отложения в значительно большей степени были загрязнены тяжелыми металлами в истоке и в промежуточной точке. Выявлена изменчивость в пространстве содержания тяжелых металлов в растениях осоки водяной (*Carex aquatilis*) в зависимости от их содержания в воде и донных отложениях, причем наблюдался акропетальный характер их распределения в растениях: корни накапливали Cd в 7-24, Pb в 2-4, Fe в 112-251 раз больше, чем побеги. Поэтому для установления загрязнения водной экосистемы реки тяжелыми металлами мы рекомендуем использовать в качестве биоиндикатора осоку водяную (особенно ее корни), которая также может применяться для фиторемедиации малых рек. Биологическая продуктивность высшей

водной растительности увеличивалась по мере продвижения от истока к устью р. Ходца.
Выявлен сложный характер накопления тяжелых металлов в мышечной ткани исследуемых видов рыб – ротана и плотвы. В ходе комплексной оценки загрязнения абиотических и биотических компонентов экосистемы проведено зонирование реки по преобладающим химическим загрязнителям (тяжелым металлам, нефтепродуктам, аммонийному азоту). Выявлены зоны повышенного экологического риска в истоке и промежуточной точке, что указывает на значительный вклад в загрязнение коммунальных и промышленных стоков г. Электросталь. Однако проведенный позже, в 2023 г., мониторинг берегового грунта реки с применением тест-объекта салата-латука показал, что в промежуточной точке содержание тяжелых металлов было больше, чем в истоке, что объясняется очень значительным уменьшением поступления загрязнителей от предприятий г. Электросталь. Поэтому для наиболее быстрой и малозатратной оценки загрязнения реки тяжелыми металлами при мониторинге следует применять фитотоксичность берегового грунта с использованием тест-объекта салата-латука.
Ключевые слова: экосистемный подход, вода, донные отложения, береговой грунт, осока водяная, рыбы, тяжелые металлы, биоиндикаторы, фитотоксичность, зонирование реки.
DOI: 10.24412/2542-2006-2025-4-63-104
EDN: CYWCLE

В настоящее время реки испытывают сильное техногенное воздействие, особенно в регионах с большим количеством промышленных предприятий и с высокой плотностью населения. Гидрологический и гидрохимический режимы рек напрямую зависят от интенсивности хозяйственного освоения (Канбетов, Куанышева, 2012; Григорьева, Комиссаров, 2014; Smith, Willian, 1986).

При значительной и продолжительной перегрузке рек сточными водами промышленных предприятий, приводящей к снижению количества растворенного кислорода и повышению концентрации загрязняющих веществ, водотоки превращаются в канализационные коллекторы и в них прекращаются нормальные процессы жизнедеятельности организмов (Михалевская-Целуйко, 2006; Злывко, 2013). Негативные изменения претерпевают как абиотические, так и биотические компоненты рек (Федоров и др., 2000; Дмитриев, Фрумин, 2004; Хаустов и др., 2015; Джамалов, 2017). К таким рекам в Московской области относится малая река Ходца, берущая свое начало на территории г. Электросталь и, по данным государственного водного реестра РФ, относящаяся к Окскому бассейновому округу.

В последнее время значительно увеличена техногенная нагрузка на реки от предприятий-природопользователей. Водотоки, выполняя транспортную функцию, переносят токсичные загрязняющие вещества с одних территорий, на которых они были образованы и поступили в водоток, на соседние. Перенос загрязняющих веществ носит трансграничный характер и вызывает целый ряд проблем – не только экологических, но и нормативно-правовых, и экономических (Гришанова, 2017; Джамалов и др., 2019). В результате нарушается устойчивость водных экосистем, способность их к самовосстановлению и саморегуляции. В связи с этим в условиях меняющейся экологической ситуации возникает потребность в мониторинговой оценке техногенной трансформации водных экосистем рек, в частности, малой реки Ходца. При этом большое значение играет техногенная аккумуляция и миграция тяжелых металлов (ТМ) – предпосылка для деградации биологического круговорота в экосистемах (Моисеенко, Гашкина, 2007; Freedman, 1989). Большая часть таких загрязнителей, как ТМ, находится в состоянии рассеяния. В отличие от органических поллютантов, ТМ не способны разрушаться до безопасных форм, а длительное время сохраняют свою активность и обладают кумулятивным эффектом. Биота адаптируется к колебаниям их содержания, но с течением времени начинает видоизменяться (Цаценко, Пасхалиди, 2018; Мурашко, Кравченко, 2017). Загрязняющие компоненты

систематически могут аккумулироваться и трансформироваться в атмосферном воздухе, растениях, почвах, воде, животных, а далее с потоком веществ проникать в организм человека, что может быть опасным для здоровья. В ходе взаимосвязи компонентов среды между собой токсичные вещества концентрируются, провоцируя повторное загрязнение. Теоретическую основу таких исследований составляют труды классиков науки (Вернадский, 1934, 1989; Виноградов, 1935; Кабата-Пендиас, 1989).

В настоящее время сохранение и восстановление водных экосистем, проведение биомониторинга состояния окружающей среды в условиях антропогенного воздействия являются актуальными задачами. Выявление и прогнозирование развития негативных процессов, происходящих в малых реках, позволит сохранить первоначальные водные экосистемы, что является необходимым условием дальнейшего их существования.

Цель исследования – разработка геоэкологической оценки взаимодействия абиотических и биотических компонентов водной экосистемы в условиях антропогенного воздействия для усовершенствования мониторинга реки. При проведении исследований решались следующие задачи: определить загрязняющие вещества в воде, снеге, береговом грунте, донных отложениях, высшей водной растительности, рыбе; оценить биоиндикаторы, биопродуктивность высшей водной растительности и зоны экологического риска на разных участках реки.

Материалы и методы

Малая река Ходца, относящаяся к рыбохозяйственному водоему II категории, протекает в восточной части Московской области, беря свое начало в окрестностях городского округа Электросталь, а ее устье находится в городе Павловский Посад, в 3.6 км по левому берегу р. Вохонки (Вохны) – правого притока р. Клязьма. Ее длина составляет 10 км. Водная система выглядит следующим образом: р. Ходца → р. Вохонка → р. Клязьма → р. Ока → р. Волга → Каспийское море (Болгов, 2018; Болгов, 2013; Дебольский, 2011; Никаноров, 2010). Картосхема территории бассейна реки представлена на рисунке 1.

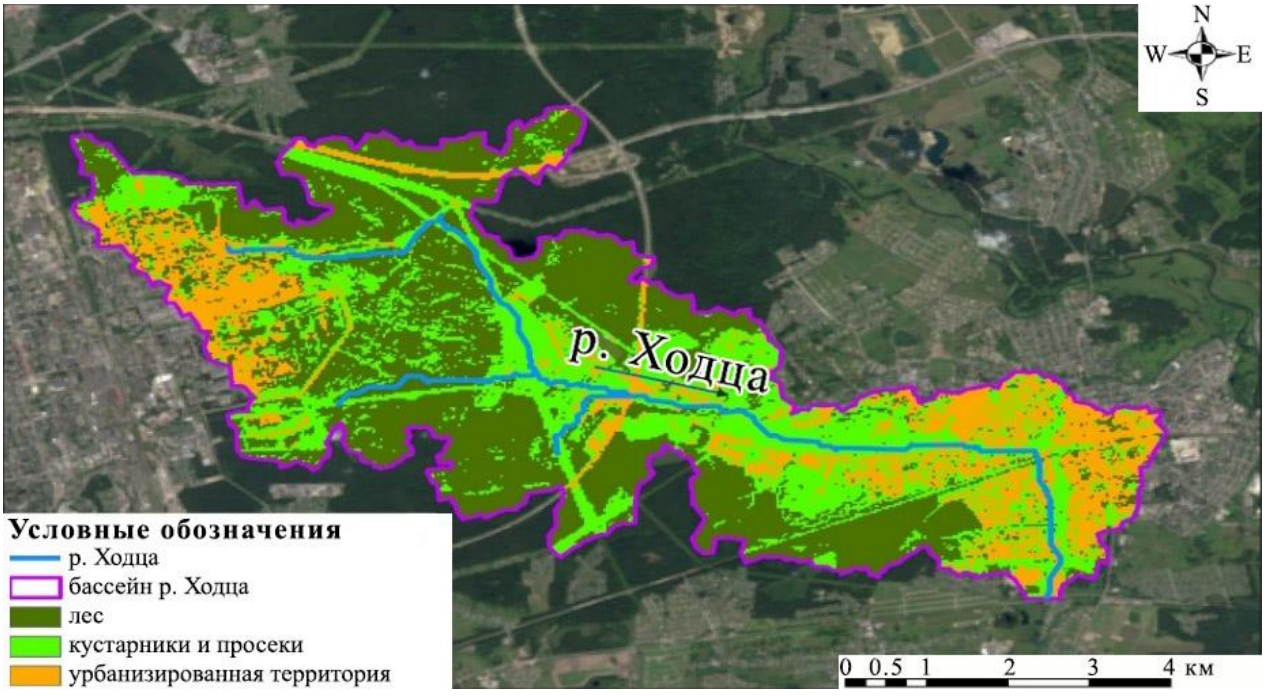

Рис. 1. Картосхема территории бассейна реки Ходца.
Fig. 1. Map of the Khodtsa River basin

Как видно из рисунка 1, участки, занятые лесом, кустарниками и просеками, занимают около 75% всей территории бассейна, а урбанизированные участки – около 25%. Отмечены факты сокращения протяженности русловой сети в истоке и в промежуточной точке. Это можно объяснить тем, что русло требует расчистки и постепенно зарастает кустарниками, которые имеют высокие показатели транспирации и способствуют сокращению запасов подземных вод, что также приводит к сокращению водности р. Ходца.

Несмотря на то, что рельеф в восточной части Подмосковья преимущественно равнинный, с обширными низменностями (с высотами до 300-500 м н.у.м. БС и малыми уклонами ≤5-6‰), уклон р. Ходца составляет 260 см/км. Ширина – 1.4 м, средняя глубина – 0.4 м, средняя скорость течения – 0.26 м/с, извилистость φ = 1.0, площадь водосбора – 39.7 км^2.

В 5 км от истока, в верхнем течении, русло перекрыто дамбой с водоспуском, по которой проходит автомобильная дорога из г. Электросталь, перед дамбой устроен пруд. Далее вниз по течению, на окраине села Субботино, на реке расположен ещё один пруд с дамбой и водоспуском. По ходу течения река несколько раз проходит коллекторы под железнодорожными путями и автодорогами. Берега в верхнем течении покрыты смешанным лесом и местами заболочены, русло спрямлено. В среднем и нижнем течении река протекает по открытой местности и активно меандрирует. Последнюю треть пути она течёт в пределах села Субботино и кварталов г. Павловский Посад (рис. 2). Тип питания реки – смешанный. Основным источником питания является сток от атмосферных осадков (дождевые и талые воды) – около 75%. На долю грунтовых вод приходится около 25%.

Рис. 2. Снимок местности со спутника с высоты 2000 м (Google.Maps, 2025).
Fig. 2. Satellite image of the area from an altitude of 2000 m (Google.Maps, 2025)

В настоящее время загрязнение рек обусловлено практически всеми видами хозяйственной деятельности, что объясняется развитием промышленности, увеличением численности населения и урбанизацией территорий, недостаточным внедрением водоочистных технологий (Даувальтер, 2012; Coping …, 2007; Селезнева, 2003).

Долговременными целями рационального использования и воспроизводства водных ресурсов является уменьшение антропогенного влияния на водные объекты и обеспечение экологически устойчивого их функционирования (Зилов, 2013).

Основными причинами загрязнения воды в реке являются сброс недостаточно очищенных хозяйственно-бытовых, сельскохозяйственных и промышленных стоков, вырубка лесов, плотная застройка, откачка подземных вод. В результате происходит загрязнение водного объекта нефтепродуктами, железом, соединениями азота, органическими соединениями и ТМ. Среди причин загрязнения малых рек, в т.ч. р. Ходца, стоит назвать также зарастание рек и водоохранных зон, эрозивные разрушения берегов, загрязнение русел и прибрежных территорий (рис. 3).

Рис. 3. Зарастание устья реки Ходца, лето 2020 г.
Fig. 3. Overgrowing mouth of the Khodtsa River, summer 2020.

В наших исследованиях при геоэкологической оценке компонентов водной экосистемы малой реки Ходца в условиях антропогенного загрязнения использовались общенаучные методы познания (синтез, статистический метод, обобщение), которые отражают количественные зависимости между загрязняющими веществами в депонирующих средах, эмпирико-теоретические (сбор, изучение и анализ данных), различные химические методы анализа загрязняющих веществ, геоэкологические методы (экспертная оценка, территориальный анализ). Выбор маркерных химических элементов (Cu, Pb, Cd, Zn, Fe) был основан на рассмотрении взаимозависимости между параметрами содержания элемента в воде и донных отложениях и откликом биологических тест-объектов на данные параметры.

Информационно-статистическая база исследования представлена отчетами по экологической безопасности АО «Машиностроительный завод» за период 2016-2023 гг., протоколами собственных исследований реки, а также протоколами, предоставленными Московско-Окским бассейновым водным управлением Федерального агентства водных ресурсов. Главным методом, используемым в работе, являлся системный подход, т.е. рассмотрение биогеохимической пищевой цепи водной экосистемы реки как целого, и количественный учет протекающих в ней потоков веществ и энергии (Розенберг, 2011; Hakanson, 1980; Антипова, 2014; Попов, 2013).

В основу работы положены материалы как полевых исследований, проведенных в 2017-2023 гг. на различных участках р. Ходца, так и лабораторных, а также некоторые документы (Отчеты …, 2015-2022; Схема …, 2916).

Общая методика работ включала в себя отбор проб воды, снега, берегового грунта, донных отложений и растений в 3 местах, распределённых по длине реки, с учетом строения береговой линии: исток (55.81 с.ш., 38.48 в.д.), промежуточная точка (55.80 с.ш., 38.52 в.д.), устье (55.77 с.ш., 38.64 в.д.). Створы 1 и 2 были расположены ниже по течению в северо-восточной части г. Электросталь. Створ 3 находился в приустьевой части, в частном секторе г. Павловский Посад по ул. Речной. Места отбора проб указаны на снимке, начерченном в программе КОМПАС (рис. 4). Места отбора подвергались различной антропогенной нагрузке. В истоке и в промежуточной точке течение практически отсутствовало. Привязка мест отбора проб осуществлялась с помощью GPS-навигатора Garmin eTrex 20x.

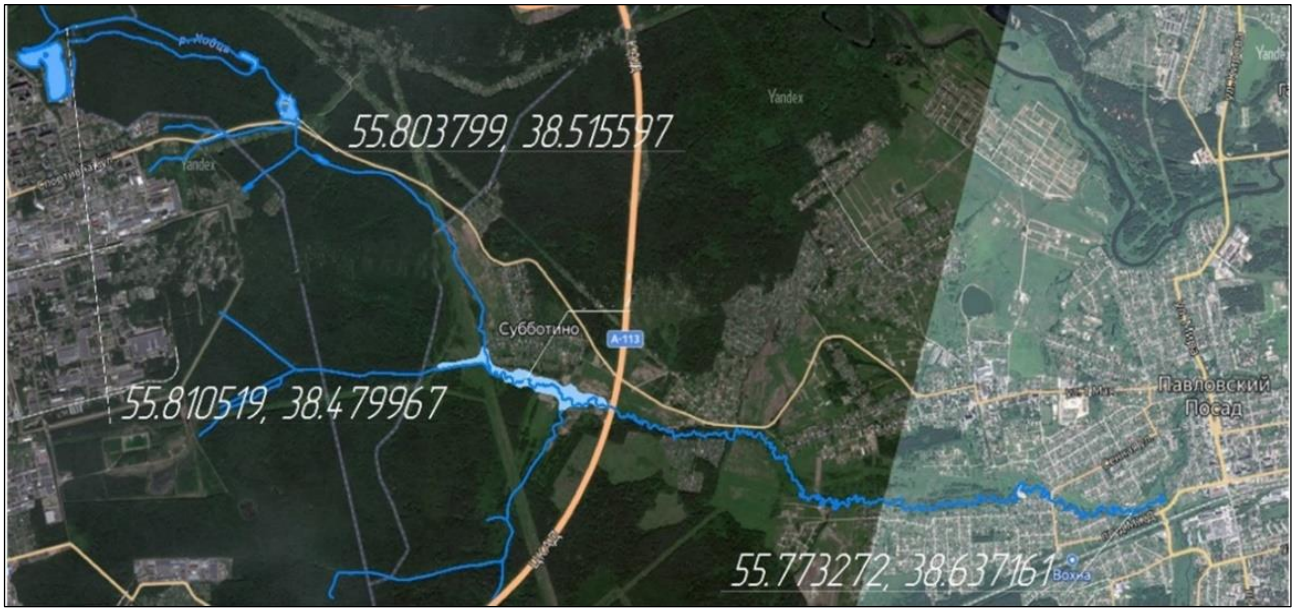

Рис. 4. Расположение точек отбора проб реки Ходца.
Fig. 4. Sampling points at the Khodtsa River.

Анализы отобранных проб были проведены на базе аккредитованных испытательных лабораторий Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, филиала Центра гигиены и эпидемиологии в Московской области (г. Ногинск) и Центра сертификации и экологического мониторинга агрохимической службы «Московский».

Для анализа отобранных образцов (проб) и оценки состояния объектов окружающей среды использовали общепринятые методики, внесенные в Реестр количественного химического анализа. Отбор проб природной поверхностной воды для установления изменений гидрохимических показателей во времени и пространстве проводили с апреля по ноябрь 2018-2020 гг. Отбор проб осуществляли в соответствии с правовыми документами, регламентирующими содержание загрязнителей в воде (ГОСТ 17.1.5.05-85, 2010; Приказ …, 2023; СанПиН …, 2000). Устройство для отбора проб – система пробоотборная для экологических исследований ПЭ-12. Объем отбираемых проб – 3 л. Пробы отбирали в пластиковые емкости объемом 1 л, пробы для определения нефтепродуктов – в стеклотару. Анализ содержания ТМ проводили методами атомно-эмиссионной спектроскопии и атомно-абсорбционной спектрометрии на спектрометрах «АФА-А» и «Квант-2мт» (ПНД …, 1998).

Определение мышьяка проводили на анализаторе ПАН-As; железа, фтора, аммиака и аммоний-иона, хрома 6+, формальдегида, фосфатов, кремния, алюминия – на спектрофотометре Cary 60, ртути – на анализаторе УКР-1 МЦ, нефтепродуктов – на флюорате 02-3М и флюорате 02-2М; алюминия, цвета, мутности – на фотоэлектроколориметре КФК-2МП; pH – на иономере ЭВ-74; аммиака и аммоний-иона, стронция, катионов и анионов – с помощью системы капиллярного электрофореза Капель-105; $БПК_{полн.}$, окисляемости перманганатной – титрованием.

Незадолго до периода снеготаяния (март) мы отобрали пробы снега с помощью стерильных инструментов методом «конверта» (Федорук, 2021). Затем образцы помещались в предварительно подготовленные контейнеры для транспортировки в лабораторию. Далее определяли следующие показатели:

- водородный показатель (pH) – измерялся с использованием стандартного pH-метра,
- сухой остаток – определялся путём выпаривания водной фазы и взвешивания оставшегося сухого вещества,
- нефтепродукты – количественное определение проводилось методом инфракрасной спектроскопии после экстракции органическими растворителями,
- ТМ (железо, кадмий, свинец) – содержания измерялись методом атомно-абсорбционной спектрометрии (ААС),
- перманганатная окисляемость – определялась как мера общего содержания органических веществ, способных окисляться перманганатом калия в кислой среде.

Анализы были выполнены в соответствии с действующими стандартами и нормативными документами, включая ГОСТы и ПНД Ф (1998). Во время всех этапов испытаний соблюдались строгие процедуры контроля качества, включая использование стандартных образцов и проведение параллельных измерений.

Работы по отбору проб берегового грунта (летняя межень 2019 г., осенняя межень 2023 г.) и донных отложений (летняя межень 2019 г.) проводили с помощью пробоотборника донных отложений ПДО-500 на капроновом тросе с глубины не менее 0.25 м и набора ручных буров. Сушку донных отложений осуществляли в лабораторных условиях (О внесении изменения …, 2011). Мы изучили изменения состава донных осадков как по ширине поперечного профиля русла, так и по длине реки, руководствуясь следующими документами: ГОСТ 27753.8-88 (1989), ГН 2.1.7.2041-06 (2006), ГОСТ 17.1.5.01-80 (2002) и М-МВИ-80-2008 (2008). Створы с точками опробования донных отложений располагались перпендикулярно руслу в конкретном месте отбора. В каждом створе было отобрано по 5 донных проб весом от 0.60 до 0.91 кг. После отбора пробы упаковывались в пластиковую тару и транспортировались в лабораторию для анализов.

Для определения гранулометрического состава проб песчаной фракции использовали ситовой метод с промывкой водой. Для определения гранулометрического состава частиц глинистой фракции использовался ареометрический метод (ГОСТ 12536-2014, 2019). В каждой точке отбора было заложено три пробных площадки. Объединенная проба формировалась из слоя глубиной 0-25 см. По результатам исследования проб, взятых в каждом месте опробования, вычисляли среднее значение содержания загрязнителя в объединенной пробе (Левшаков, 2011; Свистова, 2019).

В аккредитованной лаборатории Центр сертификации и экологического мониторинга агрохимической службы «Московский» в пробах берегового грунта и донных отложениях азот аммонийный определяли фотометрическим методом, согласно ГОСТ 27753.8-88 (1989) на приборе КФК-3-01-«ЗОМЗ», нефтепродукты – фотометрическим методом на приборе анализатор жидкости Флюорат-02-3М.

Содержание тяжелых металлов (Pb, Cd, Fe, Cu, Zn) в анализируемых образцах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии с использованием прибора «Спектр 5-4» (М-МВИ-80-2008, 2008).

В осеннюю межень 2023 г. с учетом проведенных ранее исследований мы вновь отобрали пробы берегового грунта для определения его загрязнения. С помощью тест-растения, в качестве которого использовался салат-латук, мы оценили фитотоксичность почвогрунта. Отобранный для анализа береговой грунт взвешивали и помещали в чашки Петри диаметром 9 см.

Мы провели 2 опыта с использованием почвенных пластинок.

Опыт № 1. Согласно методическим подходам (Свистова, 2019), в чашки Петри вносили по 100 г почвы, предварительно увлажняя ее до 60% полной полевой влагоемкости. При этом поверхность почвы выравнивали и раскладывали по 20 семян салата-латука. Через 3 суток оценивали всхожесть растений и рост корешков.

Опыт № 2. Согласно методу ISO 11269-2 (Галицкая, 2018), 100 г подготовленной почвы помещали в чашки Петри и засеивали 10 семенами салата-латука. Опытные и контрольные образцы закладывали в 3 повторностях. Оценку результатов проводили спустя 14 дней. В каждой повторности измеряли длину корешков, высоту побегов, всхожесть и общую биомассу растений.

Постоянную влажность поддерживали на протяжении всего периода инкубации. Чтобы исключить влияние освещенности и температуры, чашки Петри поворачивали разными сторонами и меняли местами (Свистова, 2019; Теппер, 1993). Контролем в этих опытах являлось проращивание семян на увлажненной фильтровальной бумаге диаметром 9 см (рис. 5). Чтобы не повредить тест-растения и выполнить точные замеры, мы вымывали почву через отверстия в крышках чашек Петри.

Для оценки состояния биотических компонентов водной экосистемы р. Ходца в летние межени 2019 и 2020 гг., когда растительная флора наиболее разнообразна, проводили исследования растений. В качестве возможных биоиндикаторов мы выбрали осоку водяную (*Carex aquatilis*), формирующую прибрежную полосу растительности водоема, и ряску малую (*Lemna minor*). Отбор растений для анализа проводили на тех же пробных площадках (ПП), что и отбор воды и почвогрунтов. Образцы растений изымали полностью, отмывали в воде от взвеси. Затем высушивали и подвергали анализу на содержание ТМ атомно-абсорбционным методом (ГОСТ 30692-2000, 2002). При этом в осоке водяной анализировали содержание загрязнителей отдельно в корнях и отдельно в побегах (рис. 6), в ряске малой – в общей массе.

Определение содержания тяжелых металлов (Fe, Cu, Zn, Cd, Pb) в растительном сырье проводили методом атомной абсорбции на приборе МГА-915 МД (ГОСТ 30692-2000, 2002; ГОСТ 27988-88, 2010). Анализ осуществляли после озоления воздушно-сухих образцов при температуре 550°С и растворения золы в азотной кислоте.

В связи с тем, что в летнюю межень 2019 г. исток реки был маловоден, прибрежная полоса растений промежуточной точки и устья находилась в более стабильных гидрологических условиях (Давыдов, 1973; рис. 7).

Ряску вылавливали сачком и переносили в пластиковые контейнеры с водой из водоема (рис. 8). Ее собирали в 3-кратной повторности с поверхности воды площадью 1 м^2 (Зубкова и др., 2021). Массу сырой ряски определяли сразу после взятия образца. Влага с ряски удалялась с помощью фильтровальной бумаги, после чего проводилось повторное взвешивание, но уже сухой массы.

Наблюдение и сбор проб ихтиологического материала проводили в летнюю межень 2019 г. Всего в уловах выявлено 2 вида рыб: в промежуточной точке вблизи г. Электросталь – ротан (*Perccottus glenii*); в устье на территории г. Павловский Посад –

молодь плотвы *(Rutilu srutilus)*. По численности в уловах преобладала плотва, ротан был представлен единичными экземплярами (рис. 9).

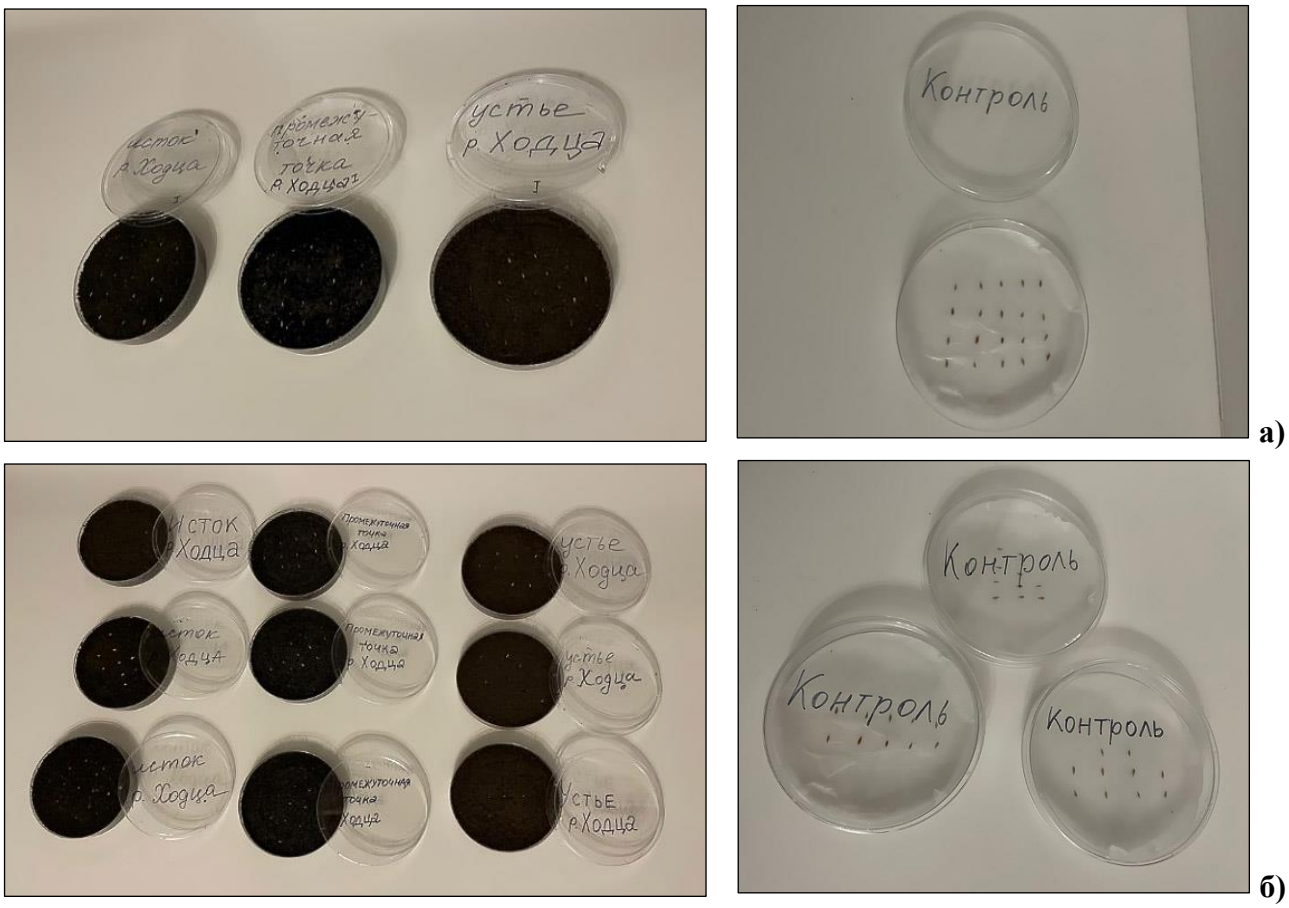

Рис. 5. Проращивание семян салата латук в опыте №1 (а) и в опыте №2 (б)
Fig. 5. Germination of lettuce seeds in experiment No. 1 (a) and in experiment No. 2 (б)

Рис. 6. Подготовка осоки водяной к анализу. **Fig. 6.** Preparation of water sedge for analysis

Рис. 7. Места отбора осоки водяной: слева – исток; справа – устье.
Fig. 7. Water sedge sampling locations: left – source; right – mouth.

Рис. 8. Отбор ряски малой в среднем течении реки (слева – 2019 г., справа – 2020 г.).
Fig. 8. Sampling of duckweed in the middle reaches of the river (left – 2019, right – 2020).

Анализ рыбы на содержание тяжелых металлов проводили в лаборатории Центра гигиены и эпидемиологии в МО. Анализу подвергали мышечные ткани рыб. Определение содержания ТМ в отобранных пробах проводили атомно-абсорбционным методом на приборе спектрометре «Квант-2мт» (ГОСТ 30178-96, 2010). Соответствие образцов необходимому качеству рыбы устанавливали по техническому регламенту ТР ТС 021/2011 (2011).

а) **б)**

Рис. 9. Видовой состав улова: а) – ротан, б) – плотва.
Fig. 9. Species composition of the caught fish: a) – Amur sleeper, б) – common roach.

При проведении наших исследований количество отобранных проб воды составляло 90, донных отложений – 45, берегового грунта – 90, растений – 54. Согласно ГОСТам, из индивидуальных проб составлялись объединенные пробы, которые и анализировались в лабораториях.

Достоверность результатов исследования обеспечена всесторонним теоретическим анализом проблемы и применением обширного набора современных методов при выполнении лабораторных исследований, а также комплексной оценкой степени загрязненности абиотических и биотических компонентов водной экосистемы данной реки по отдельным загрязняющим веществам с использованием статистических приемов. Зависимость между содержанием ТМ в донных отложениях и растениях, а также в надземных и подземных органах оценивали корреляционным анализом с определением коэффициента линейной корреляции Пирсона. Для систематизации сведений по содержанию загрязнителей в донных отложениях и береговом грунте, побегах и корнях осоки проводили кластерный анализ. Существенность различий в продуктивности растений на различных участках реки устанавливали методом дисперсионного анализа. Обработку полученных результатов осуществляли с применением программного обеспечения Microsoft Office. Анализ данных выполнен в ПСП Statistica, версия 6.0 для Windows.

Результаты и обсуждение
Экосистемный подход к геоэкологической оценке малой реки Ходца в условиях техногенеза

Водная экосистема, как и любая другая экосистема, представляет собой единый комплекс живых организмов и среды их обитания, находящихся в непрерывном взаимодействии друг с другом. Согласно основному экологическому принципу, получение ресурсов и избавление от отходов в природной экосистеме происходит в рамках биогеохимического круговорота

химических элементов, поэтому при оценке антропогенного воздействия на природную экосистему важно определить, какие химические элементы (особенно токсичные) привносятся в нее из внешних источников.

В водной экосистеме абиотические компоненты (вода, донные отложения, береговой грунт) определяют важнейшие процессы, от которых зависит функционирование биотических компонентов (т.е. всех обитающих живых организмов). Поэтому экосистемный подход к геоэкологической оценке водной экосистемы должен основываться на комплексном количественном исследовании миграции химических элементов во всех звеньях биогеохимической пищевой цепи конкретной водной экосистемы.

В настоящее время в основном на риск ухудшения экологической ситуации экосистемы количественно указывает уровень превышения содержания загрязняющего вещества над установленным для этого вещества нормативом (ПДК, МДУ) в конкретном компоненте экосистемы. Однако в последние годы появилось междисциплинарное научное направление экотоксикология, связанное с токсическими эффектами химических веществ на живые организмы, в котором рассматриваются вопросы поступления, трансформации, биологического накопления токсичных веществ в окружающей среде, их удаление из среды, а также изменения в сообществах живых организмов при экотоксикологическом стрессе. Именно данные вопросы должны являться теоретической основой при решении экологических проблем, вызванных химическим загрязнением экосистем. Основными методами экотоксикологии являются биоиндикация и биотестирование. При геоэкологической оценке водной экосистемы малой реки Ходца биоиндикаторами могут выступать высшая водная растительность и рыбы, которые входят в состав биотических компонентов данной реки.

Среди приоритетных высокотоксичных загрязняющих химических веществ особое место занимают тяжелые металлы. В отличие от органических загрязняющих веществ, которые могут разлагаться, ТМ способны только к перераспределению между отдельными компонентами экосистемы, поэтому может происходить биоаккумуляция этих химических элементов через биогеохимическую пищевую цепь. Таким образом, вопросы миграции ТМ в системе «вода – донные отложения – береговой грунт – высшая водная растительность – рыбы» и аккумуляция их живыми организмами должны занимать центральное место при геоэкологической оценке водных экосистем малых рек.

Значительное количество загрязняющих веществ в р. Ходца поступает от сточных вод жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) и промышленных предприятий г. Электросталь (Об утверждении …, 2017; Проект …, 2017), являющегося одним из ведущих промышленных городов Московской области, предприятия которого способствуют образованию мощного потока загрязняющих веществ в поверхностные воды. Многие загрязняющие вещества характерны сразу для нескольких видов производств. Основными промышленными объектами г. Электросталь являются ОАО «Электростальский химико-механический завод им. Н.Д. Зелинского», АО «Машиностроительный завод» (АО «МСЗ»), ОАО «Металлургический завод «Электросталь» и ОАО «Электростальский завод тяжелого машиностроения».

Река Ходца вместе с рекой Марьинка (ручей Безымянный) являются приемником сточных вод от АО «Машиностроительный завод», в то же время АО «МСЗ» – единственный водопотребитель р. Ходца. Постепенно данные водные объекты перестают справляться с поступающими в них объёмами городских сточных вод, сбрасываемых через систему дождевой канализации. Поэтому на месте малой реки с течением времени может образоваться низинное болото с травянистой растительностью. Продолжающиеся отложения отмирающих трав будут поднимать поверхность торфяных массивов все выше и выше, пока она не перестанет затопляться весенней водой.

Структура сточных вод, сбрасываемых в притоки р. Ходца, значительно отличается от таковой по всему бассейну. Доля условно чистых вод, сбрасываемых в реку, составляет менее 20%, тогда как доля загрязненных достигает 80% (Отчеты …, 2015-2022). Объемы сброса производственных сточных вод с промышленной площадки АО «МСЗ» в ливневую канализацию (ЛК) в 2023 г. существенно отличались от объемов 2019 г.: они уменьшились более чем в 36 раз (рис. 10). Среди загрязняющих веществ, сбрасываемых в открытую гидросеть, в стоках АО «МСЗ» наибольший вклад вносят F, нефтепродукты, Cu, Zn (III класс опасности); аммоний-ион, $Fe_{общ.}$ (IV класс опасности). Загрязнители представлены также хлоридами, нитратами, нитритами, фосфатами.

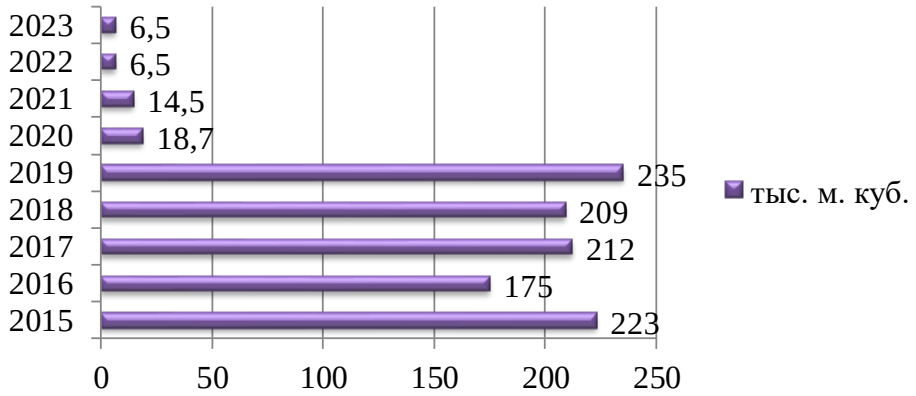

Рис. 10. Динамика объемов сброса производственных сточных вод в ЛК с промплощадки АО «МСЗ» в 2015-2022 гг. **Fig. 10.** Volumes of industrial wastewater discharge into the storm sewer from the industrial site of the “MSZ” enterprise in 2015-2022.

Наибольший вклад в выбросы загрязняющих веществ в атмосферу от АО «МСЗ» в 2017-2023 гг. вносили твердые вещества, в т.ч. оксид Fe, достигающий в отдельные годы величины предельно допустимых выбросов. Большая доля выбросов в атмосферу приходилась на твердые вещества, оксиды азота, оксид углерода.

Предлагаемый нами экосистемный подход к экологической оценке водных объектов включает выбор объекта и предмета исследования, отбор свойств и признаков, вовлекаемых в исследование, методы получения и обработки информации об объекте, в т.ч. сбор и анализ данных о близлежащих предприятиях, приемы нахождения эмпирических зависимостей, полевой отбор и химический анализ образцов как абиотических (вода, снег, донные отложения, береговой грунт), так и биотических (высшая водная растительность, рыбы) компонентов, составляющих биогеохимическую пищевую цепь конкретной экосистемы; подбор подходящих биоиндикаторов для геоэкологической оценки состояния водной экосистемы на разных участках реки. На рисунке 11 представлена составленная нами блок-схема экологического мониторинга водных объектов на примере малой реки Ходца.

Закономерности миграции приоритетных загрязнителей (тяжелых металлов) в системе «вода – донные отложения – береговой грунт – растения – рыбы»

Проведенные нами предварительные исследования и анализ пространственно-временного состояния основных показателей качества воды р. Ходца, изучение динамики этих показателей по течению реки в условиях антропогенного воздействия указывали на то, что качество воды не соответствует санитарно-эпидемиологическим правилам и нормативам СанПиН 1.2.3685-21 (2021) по ряду показателей, причем условия отдельных лет накладывали отпечаток на пространственно-временные концентрации химических соединений.

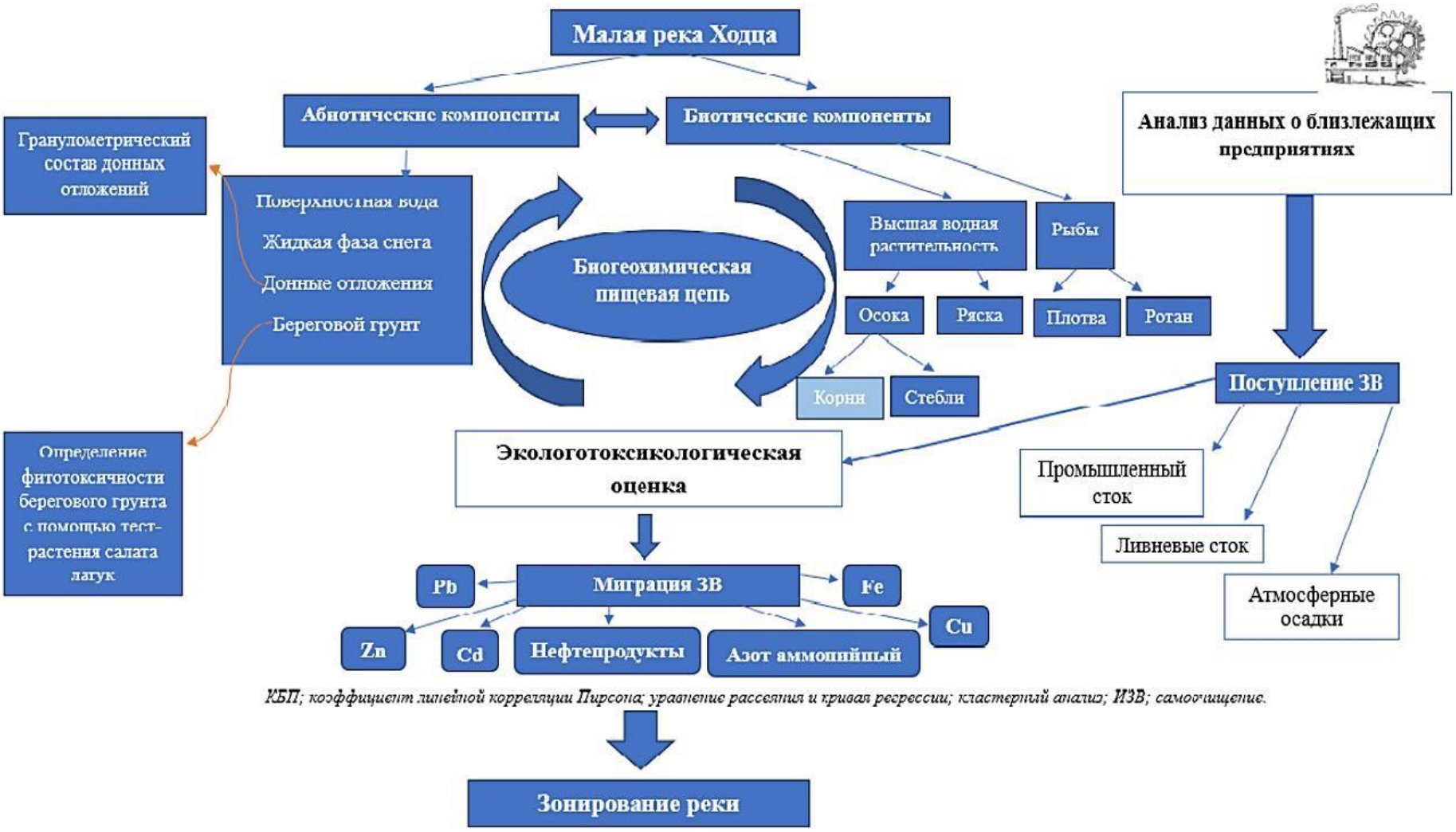

Рис. 11. Блок-схема экологического мониторинга водных объектов (на примере малой реки Ходца).
Fig. 11. Block diagram of environmental monitoring of water bodies (using the example of the small Khodtsa River).

Средние уровни содержания тяжелых металлов за 2018-2020 годы, установленные в осенне-зимнюю межень, свидетельствовали о превышении предельно допустимых концентраций во всех местах отбора проб воды по железу, свинцу и меди; превышение ПДК по марганцу наблюдалось в устье, а превышение ПДК по никелю – в истоке и устье (табл. 1).

Таблица 1. Содержание ТМ в воде р. Ходца, среднее за 2018-2020 гг., мг/дм^3. **Table 1.** Heavy metals in the Khodtsa River, average value for 2018-2020, mg/dm^3.

Определяемый показатель	Место взятия образца			ПДК
	Исток	Промежуточная точка	Устье	
Fe	18.47±2.46	1.76±0.23	4.4±0.59	0.1
Mn	0.01±0.002	0.01±0.002	0.077±0.019	0.01
Ni	0.015±0.001	0.01±0.001	0.015±0.001	0.01
Cu	0.02±0.002	0.02±0.002	0.03±0.001	0.001
Zn	0.03±0.003	0.01±0.001	0.01±0.001	0.01
Sr	0.25±0.025	0.25±0.025	0.25±0.025	0.4
Cd	0.004±0.001	0.0004±0.0001	0.003±0.001	0.005
Pb	0.016±0.005	0.008±0.002	0.008±0.002	0.006

В периоды летней межени в верхнем течении реки в отдельные годы были превышения ПДК по кадмию в 2 раза, по свинцу – в 3.8 раза. В летнюю межень 2018 года в поверхностной воде во всех местах определения фоновое содержание было превышено по железу, нефтепродуктам и фосфатам, а в верхнем течении – по аммонийному азоту. В качестве фонового взят участок р. Вохонка – 0.5 км выше впадения р. Марьинка (табл. 2).

Таблица 2. Химический состав поверхностной воды в летнюю межень 2018 г., мг/л.
Table 2. Chemical composition of surface water during the summer low water in 2018, mg/l.

Определяемые показатели	Содержание в воде			$C_{фон}$
	Верхнее течение	Среднее течение	Нижнее течение	
Взвешенные вещества	7.69	0.41	0.51	19.5
$БПК_{полн.}$	2.23	1.40	0.09	5.69
ХПК	0.48	0.28	0.19	29.5
Аммонийный азот	13.36	0.64	0.26	1.4
$Fe_{общ.}$	14.56	2.4	1.26	1.25
Нефтепродукты	0.93	0.84	0.12	0.09
Фосфаты	0.61	0.61	0.61	0.163

В целом, воды реки характеризуются как «грязные». Среди загрязняющих веществ преобладают соединения железа, кадмия, свинца, аммонийного азота и нефтепродуктов. Выявлена тенденция некоторого улучшения качества вод вниз по течению. При интерпретации результатов измерений качества воды следует учитывать, что они могут меняться в зависимости от времени отбора проб. Концентрации маркерных загрязнителей в воде р. Ходца (тяжелых металлов, аммонийного азота, нефтепродуктов) позволяют идентифицировать преобладающий генезис поллютантов за счет ливнестоков с промышленных территорий.

Проведенные нами исследования гранулометрического состава донных отложений р. Ходца для предварительной оценки степени деградации речного русла и принятия последующих мер по его очистке и восстановлению указывают на его изменчивость как по длине реки, так и по её поперечному русловому профилю. Для донных осадков характерно преобладание песчаных частиц, составляющих в среднем 77.1% от объёма проб.

По сравнению с береговым грунтом донные отложения реки в значительно большей степени загрязнены ТМ в истоке и промежуточной точке. Так, в истоке содержание кадмия и железа превышает их содержание в береговом грунте в 5 раз и более, а свинца – в 314 раз. В дальнейшем по протяженности реки разница в содержании загрязнителей резко уменьшается. Превышения содержаний изучаемых элементов в промежуточной точке составляют, соответственно, по Cd – 2.0, Pb – 4.2, Fe – 1.7 раза. В устье содержание кадмия в ДО равно всего 60% от содержания в береговом грунте, а железа и свинца – превышает в 2.2 и 1.3 раза (табл. 3).

Таблица 3. Содержание загрязняющих веществ в донных отложениях и береговом грунте р. Ходца в летнюю межень, 2019 г., мг/кг. **Table 3.** Pollutants content in bottom sediments and coastal soil of the Khodtsa River during the summer low water in 2019, mg/kg.

Загрязняющие вещества	Исток	Промежуточная точка	Устье
Cd	2.29±0.16* 0.46±0.03	0.45±0.03 0.23±0.02	0.03±0.002 0.05±0.003
Pb	6.28±0.44 0.02±0.001	5.11±0.36 1.22±0.08	0.78±0.05 0.58±0.04
Fe	5159±361.1 902±63.14	1374±96.18 790±55.3	577.0±40.39 263±18.41
Zn	24.9 8.3	33.8 11.27	55.6 18.53
Cu	6.73 2.24	8.23 2.47	15.4 5.13
Азот аммонийный	71.1±4.98 13.1±0.92	11.4±0.80 8.88±0.62	8.30±0.59 13.8±0.97
Нефтепродукты	1550±108.5 185±12.95	38.7±2.70 48.7±3.40	5±0.35 5±0.35

Примечание к таблице 3: * – в числителе – донные отложения, в знаменателе – береговой грунт. **Note to Table 3:** * – bottom sediments above the line, coastal soil under the line.

Максимальные значения аммонийного азота в донных отложениях отмечены в истоке, при этом предельно допустимые концентрации (ПДК = 10.0) были превышены более чем в 7 раз, что говорит о довольно свежем загрязнении. Содержание аммонийного азота в донных отложениях в истоке превышало его содержание в береговом грунте более чем в 5 раз.

Расчёт коэффициентов линейной корреляции Пирсона между содержанием физического песка, физической глины и содержанием ТМ указывает на среднюю отрицательную связь содержания кадмия и железа (R = –0.26) и слабую положительную – свинца (R = 0.18) с содержанием песчаной фракции и на среднюю положительную связь содержания кадмия и железа (R = 0.26) и слабую отрицательную – свинца (R = –0.18) с содержанием глинистой фракции.

Статистическая обработка полученных результатов указывает на неоднородный характер связи между абиотическими компонентами р. Ходца. Так, в летнюю межень 2018 года коэффициенты корреляции между содержанием загрязняющих веществ в воде и в донных отложениях отражали высокую положительную связь по Cd (R = 0.66), Fe (R = 0.66) и аммонийному азоту (R = 0.67), а по Pb (R = 0.44) и нефтепродуктам (R = 0.40) – на среднюю положительную связь; т.е. наиболее тесной она являлась для аммонийного азота, кадмия и железа. В ходе корреляционного анализа установлена высокая положительная связь между Fe и Cd (R = 0.67), Fe и Pb (R = 0.52) в донных отложениях, что можно объяснить склонностью ТМ накапливаться в железистых конкрециях.

Результаты пространственного изучения гранулометрического состава реки указывают на повышенное содержание глинистых частиц в среднем и нижнем течении по створам 2 и 3. В этих створах обнаружены также отложения техногенных илов, что может быть связано со значительной их долей в осадках коммунальных и промышленных стоков г. Электросталь. Накопление техногенных илов в русле и содержание загрязняющих веществ в воде и донных осадках является приоритетной задачей экологического мониторинга в окрестностях городов Электросталь и Павловский Посад.

В 2023 г., когда объем сбросов сточных вод в ЛК с промплощадки АО «МСЗ» уменьшился по сравнению с 2019 г., мы оценили чувствительность контактного метода определения фитотоксичности берегового грунта р. Ходца в 3 местах опробования (исток, промежуточная точка, устье) с использованием тест-растения салата-латука, чтобы выявить возможность его применения при мониторинге реки. Степень фитотоксичности берегового грунта, выраженную в процентах, рассчитывали по изменению длины корешков и проростков салата. Фитотоксичность берегового грунта, определяемая на 3 сутки по корешкам и проросткам салата, в промежуточной точке была средней (48% и 52% соответственно), у истока – слабой по корешкам (27%), по проросткам – не проявлялась (16%), в устье – слабой по корешкам и проросткам (37.5% и 40%). Результаты химического анализа отобранного берегового грунта на содержание ТМ подтвердили, что в промежуточной точке и устье содержание железа в береговом грунте было, соответственно, в 3.8 и 1.7 раза выше, чем в истоке; содержание свинца в береговом грунте промежуточной точки и в устье было выше в 1.4 и 1.3 раза, чем в истоке. Следовательно, использование метода фитотоксичности берегового грунта с применением растительного тест-объекта салата-латука для оценки загрязнения реки ТМ является быстрым и недорогостоящим способом экотоксикологической оценки на разных участках реки.

Преобладающими растениями р. Ходца, которые подвергались анализу, являлись осока водяная (*Carex aquatilis*) и ряска малая (*Lemna minor*). На разных участках реки прослеживались различия в интенсивности накопления ТМ данными растениями. Так, в 2019 году содержание кадмия в побегах осоки в разных местах произрастания варьировало более чем в 4 раза; свинца – более чем в 1.6, железа – в 3.2 раза (табл. 4); в ряске – в 1.2, 1.1 и 7.8 раза соответственно (табл. 5).

Необходимо отметить акропетальный характер распределения ТМ в растениях. Так, корни накапливали Cd в 7.0-23.8, Pb – в 2.2-4.0, Fe – в 112.0-250.7 раз больше по сравнению с побегами (табл. 6), что свидетельствует о наличии у растений физиолого-биохимических барьеров, препятствующих накоплению загрязнителей в побегах. Это, очевидно, и позволяет выживать осоке при экстремальной концентрации загрязнителей в водоеме.

Химический состав растений отражает элементный состав среды обитания, в связи с чем содержание изучаемых элементов в большей степени должно коррелировать с составом донных отложений. Кроме того, для отдельных элементов важным является состояние равновесия в системе «твердая фаза – раствор», определяющее сорбционные процессы,

характер и направленность которых зависит от свойств и состава берегового грунта и донных отложений.

Таблица 4. Содержание тяжелых металлов в побегах осоки, мг/кг воздушно-сухой массы.
Table 4. Content of heavy metals in sedge shoots, mg/kg of air-dry mass.

Элемент	Исток	Промежуточная точка	Устье
Cd	0.178±0.01* 0.10±0.01	0.061±0.01 0.07±0.01	0.038±0.01 0.04±0.005
Pb	0.59±0.04 0.17±0.01	0.46±0.03 0.21±0.02	0.36±0.02 0.11±0.01
Fe	341.0±23.8 147.6±11.4	302.0±21.14 70.9±6.6	106.0±7.42 44.2±4.31
Zn	8.03±0.76	11.49±1.52	9.14±1.03
Cu	3.5±0.02	3.4±0.02	3.2±0.02

Примечание к таблице 4: * – в числителе – 2019 г., в знаменателе – 2020 г.
Note to Table 4: * – 2019 above the line, 2020 under the line.

Таблица 5. Содержание тяжелых металлов в воде, донных отложениях и ряске.
Table 7. Heavy metals content in water, bottom sediments and duckweed.

Определяемый показатель	Содержание ТМ, мг/кг		
	Вода	Донные отложения	Ряска
Fe	18.7±2.8* 0.522±0.157	5159±361 1374±96	5864.32±879.65 754.60±113.19
Cd	0.0005±0.0001 0.0005±0.0001	2.29±0.16 0.45±0.03	0.571±0.064 0.464±0.054
Pb	0.02±0.006 0.02±0.006	6.28±0.44 5.11±0.36	0.539±0.051 0.491±0.053
Zn	0.03±0.003 0.01±0.001	24.9±2.13 33.8±4.01	34.68±2.93 41.75±3.18
Cu	0.02±0.002 0.04±0.001	6.73±0.44 8.23±0.92	8.76±1.41 10.14±1.38

Примечание к таблице 5: * – в числителе – исток, в знаменателе – промежуточная точка.
Note to Table 7: * – the river source above the line, the intermediate point under the line.

Статистический анализ результатов исследований позволил выявить высокую положительную связь между содержанием кадмия, железа в побегах и корнях осоки, с одной стороны, и береговом грунте и донных отложениях, с другой; свинца – в побегах и корнях и донных отложениях. Кроме того, наблюдалась слабая положительная связь между содержанием железа в воде и побегах и средняя положительная связь между содержанием железа в воде и корнях (табл. 7).

Проанализировав ряску на содержание ТМ, мы выявили, что большая часть их при повышении загрязненности среды накапливалась в растениях (табл. 5). Это проявилось

внешними морфологическими отклонениями: корни отпали, листецы рассоединились, появились некроз, хлороз, окраска менялась с зеленого на буро-зеленый, бурый и коричневый цвета.

Таблица 6. Содержание тяжелых металлов в корнях осоки в 2019 г., мг/кг. **Table 5.** Heavy metals content in sedge roots in 2019, mg/kg.

Элемент	Исток	Промежуточная точка	Устье
Cd	1.24±0.09	1.24±0.09	0.903±0.06
Pb	2.36±0.16	1.45±0.10	0.78±0.05
Fe	39800.0±278.6	33785.0±2364	26570.0±1859
Zn	15.59±1.40	17.73±1.61	15.16±1.45
Cu	3.13±0.21	3.53±0.22	3.06±0.19

Таблица 7. Коэффициенты корреляции между содержанием тяжелых металлов в воде и депонирующих средах и осоке в 2019 г. **Table 6.** Correlation coefficients between the content of heavy metals in water and depositing media and sedge plants in 2019.

Элемент	Вода		Береговой грунт		Донные отложения	
	побеги	корни	побеги	корни	побеги	корни
Cd	-0.42	-0.67	0.64	0.55	0.67	0.43
Pb	–	–	-0.35	-0.36	0.61	0.61
Fe	0.11	0.31	0.67	0.63	0.50	0.61
Zn	-0.50	-0.24	0.05	-0.26	0.05	-0.26
Cu	-0.63	-0.41	-0.64	-0.37	-0.66	-0.32

В промежуточной точке на площади в 1 м^2 приходилось около 200 растений ряски с 3-4 щитками на одном растении, причем щитков с повреждениями не наблюдалось, что соответствует степени загрязненности воды по шкале – «умеренно загрязненная». В истоке количество растений на площади в 1 м^2 составляло 150, причем на каждом растении было по 1-2 щитка и наблюдались щитки с некрозом. Общее число материнских щитков – 150, а доля повреждений составила 22.5%. Корреляционный анализ зависимости содержания ТМ в ряске от концентрации ТМ в воде и донных отложениях указал на высокую положительную связь содержания всех изучаемых ТМ в растениях с их количеством в донных отложениях: R = 0.66 для Fe, 0.64 для Cd, 0.62 для Pb, 0.65 для Zn, 0.63 – для Cu.

При изучении биогенной миграции химических элементов для оценки способности живых организмов поглощать и накапливать химические элементы используют коэффициент биологического поглощения (КБП). КБП для водных организмов, учитывающий содержание ТМ в воде и донных отложениях и показывающий степень толерантности растений, определяется физиологическими особенностями *Carex aquatilisu* и *Lemna minor*, а также количеством и видом ТМ (рис. 12-17).

Установленная зависимость коэффициентов биологического поглощения металлов в растениях от содержания соответствующих ТМ в воде и в донных отложениях неоднозначна в пространстве.

Показатель биопродуктивности является важным параметром при оценке загрязненности водоемов и лежит в основе определения экологического риска. При этом он используется как показатель трофического уровня водоема. Мы оценили продуктивность осоки водяной (табл. 8) и ряски малой на разных участках р. Ходца. Общая масса осоки в устье была в 1.5 раза выше, чем в истоке. Общая масса ряски в среднем течении была больше (48.7 г/м^2) по сравнению с верхним течением (42.2 г/м^2).

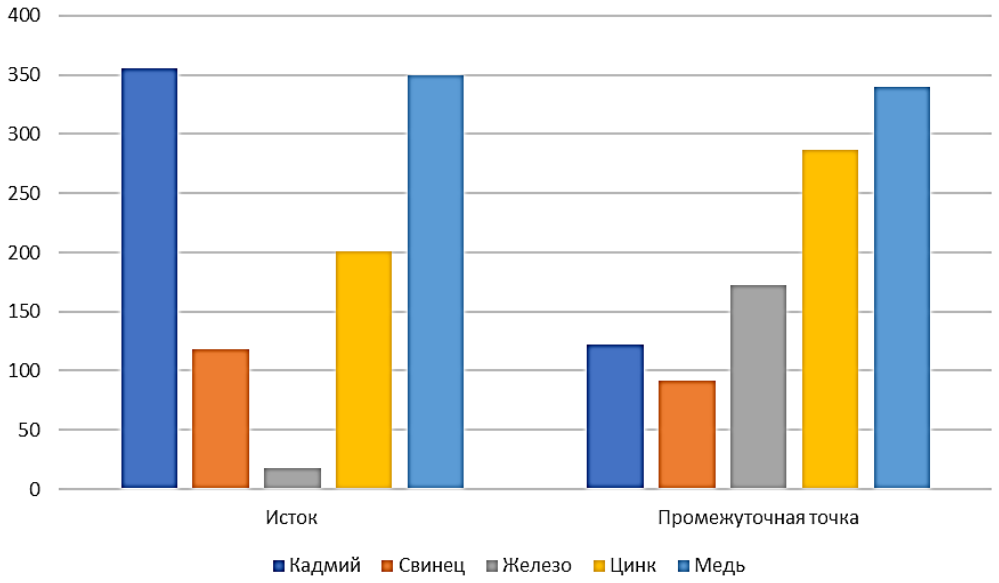

Рис. 12. КБП ТМ побегами осоки по отношению к их содержанию в воде. **Fig. 12.** Biological absorption coefficients of heavy metals by the sedge shoots in relation to their content in the water.

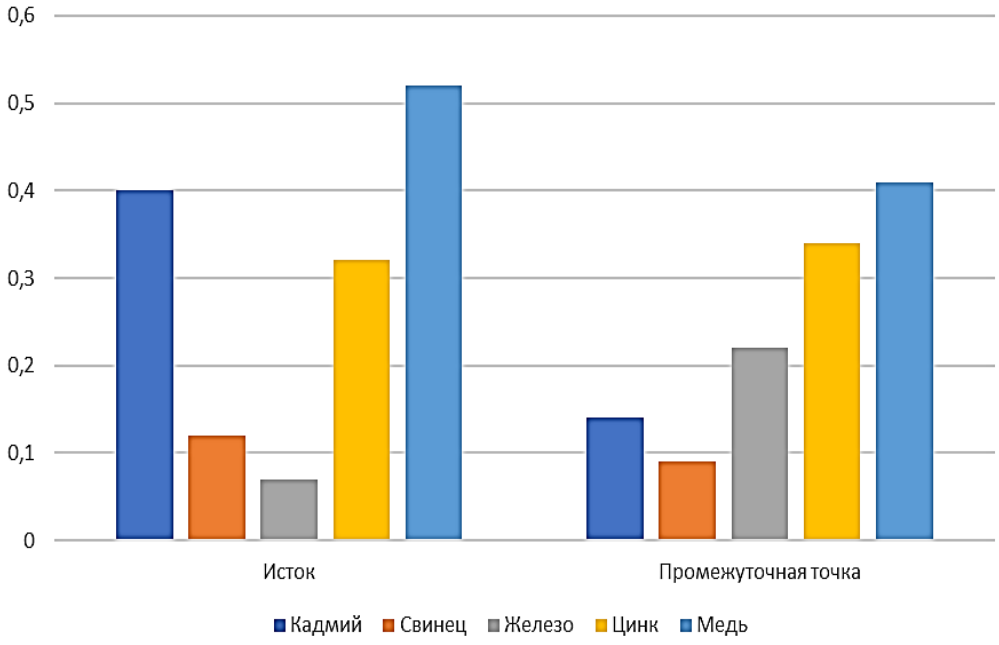

Рис. 13. КБП ТМ осокой (побеги) по отношению к их содержанию в донных отложениях. **Fig. 13.** Biological absorption coefficients of heavy metals by the sedge shoots in relation to their content in the bottom sediments.

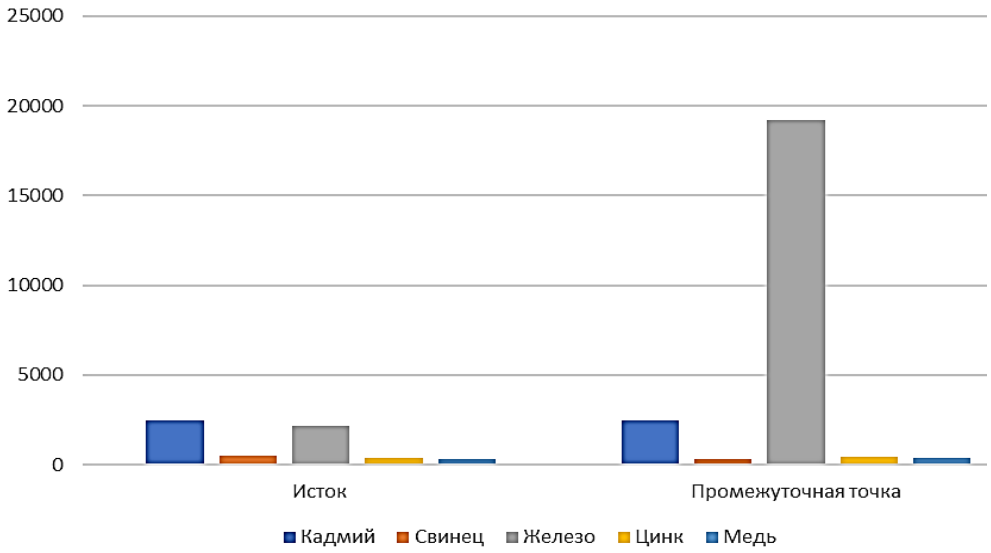

Рис. 14. КБП ТМ осокой (корни) по отношению к их содержанию в воде. **Fig. 14.** Biological absorption coefficients of heavy metals by the sedge roots in relation to their content in the water.

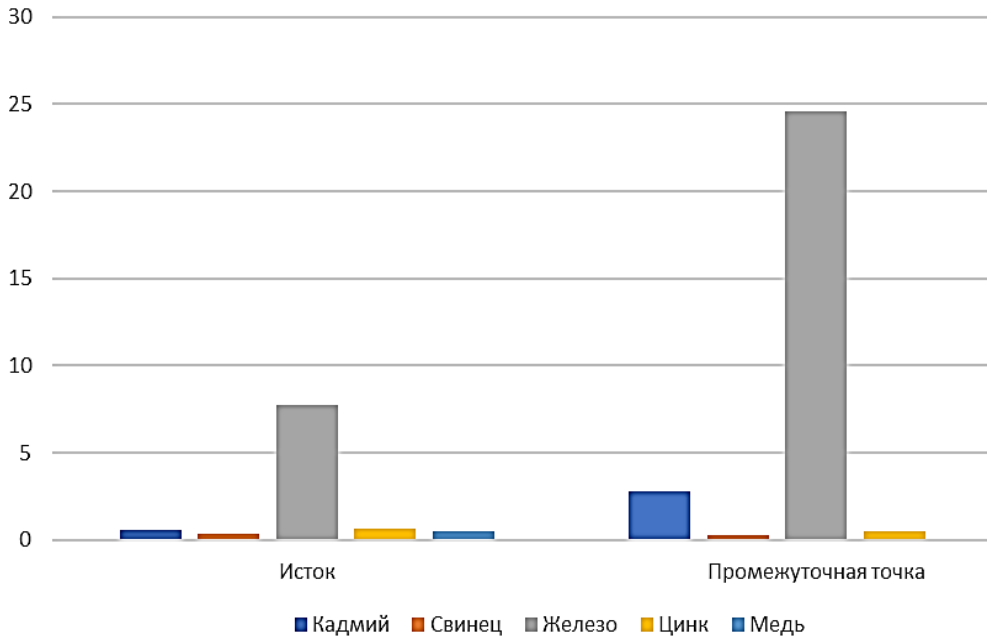

Рис. 15. КБП ТМ осокой (корни) по отношению к их содержанию в донных отложениях. **Fig. 15.** Biological absorption coefficients of heavy metals by the sedge roots in relation to their content in the bottom sediments.

По приведенным результатам можно рассчитать количество ТМ, вовлекаемых в биологический круговорот высшей водной растительностью (табл. 9). Общее количество извлекаемых растениями загрязнителей колебалось в широких пределах – в зависимости от вида растений и изучаемых химических элементов.

Интенсивность поглощения элементов органами осоки водяной изменялась в зависимости от вида элемента. Так, в корнях осоки содержания Pb и Fe варьировали

в широких пределах в зависимости от содержания их в среде. По способности проникать в побеги осоки выделялись такие элементы, как Fe и Cd, в корни – Fe. Концентрация ТМ в ряске малой также определялась, в первую очередь, видом элемента и его концентрацией в среде обитания.

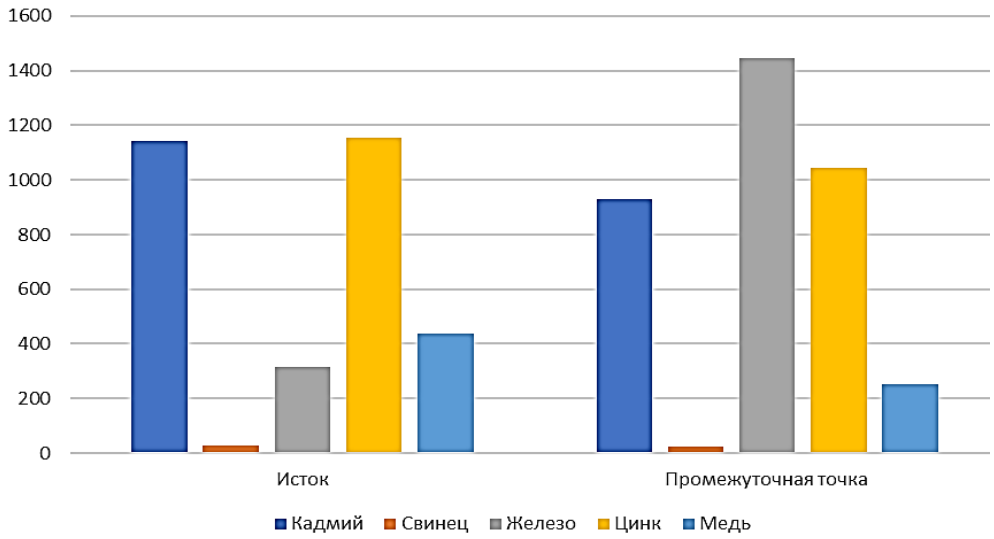

Рис. 16. КБП ТМ ряской по отношению к их содержанию в воде. **Fig. 16**. Biological absorption coefficients of heavy metals by the duckweed in relation to their content in the water.

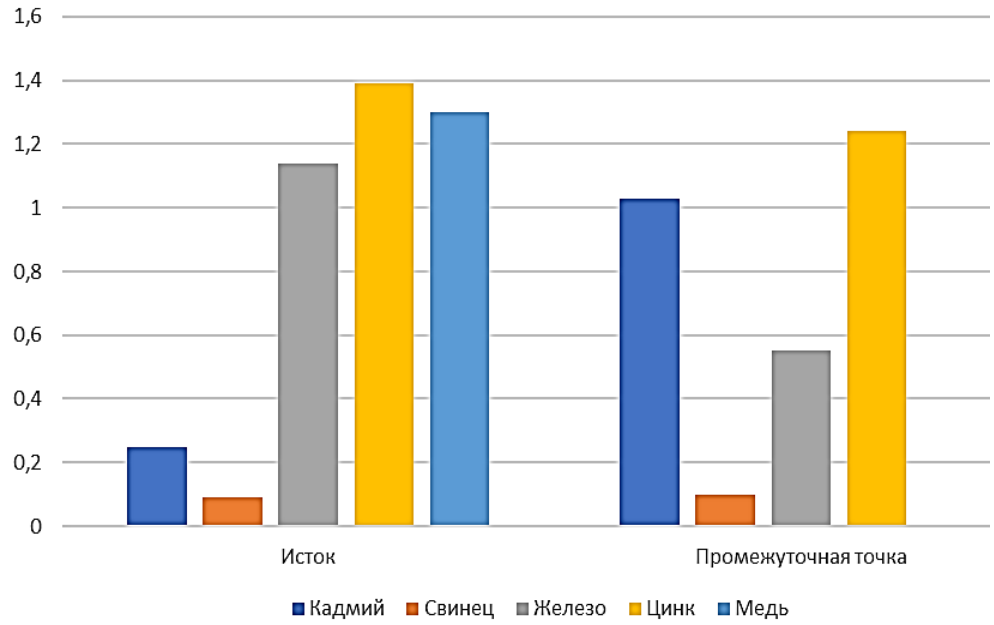

Рис. 17. КБП ТМ ряской по отношению к их содержанию в донных отложениях.
Fig. 17. KBP of TM duckweed in relation to their content in the bottom sediments.

В настоящее время р. Ходца превращается в изолированный и непроточный водоем. Так, содержание растворимого кислорода в её воде в летнюю межень 2018 г. на различных участках составляло всего 6.8-7.0 мг/дм^3. В связи с этим большинство видов рыб, ранее

обитавших в реке, уменьшилось. За годы исследований нам удалось обнаружить и отобрать образцы только 2 видов, относящихся к разным экологическим нишам: ротан (*Perccottus glenii*) и плотва (*Rutilu srutilus*).

Таблица 8. Биопродуктивность осоки водяной в р. Ходца, среднее за 2019-2020 гг., г/м^2.
Table 8. Bioproductivity of water sedge in the Khodtsa River, average for 2019-2020, g/m^2.

Место отбора	Осока водяная		
	Стебли	Корни	Общая масса
Исток	126	124	250
Промежуточная точка	96	95	191
Устье	183	181	364
$НСР_{05}$	10.3	11.8	12.6

Таблица 9. Биологический вынос тяжелых металлов высшей водной растительностью, мг/м^2.
Table 9. Biological removal of heavy metals by higher aquatic vegetation, mg/m^2.

Показатели	Осока водяная			Ряска малая
	Стебли и листья	Корни	Общее содержание	Общее содержание
Исток				
Cd	0.022	0.154	0.176	0.036
Pb	0.074	0.293	0.367	0.135
Fe	42.97	4935.20	4978.17	247.47
Zn	1.012	1.933	2.945	1.69
Cu	0.441	0.388	0.829	0.43
Промежуточная точка				
Cd	0.006	0.118	0.124	0.020
Pb	0.044	0.138	0.182	0.021
Fe	28.99	3209.58	3238.57	31.84
Zn	1.103	1.684	2.787	1.76
Cu	0.326	0.335	0.661	0.428
Устье				
Cd	0.069	0.166	0.235	Растения отсутствовали
Pb	0.066	0.144	0.210	
Fe	19.398	4888.88	4908.278	
Zn	1.672	2.789	4.461	
Cu	0.586	0.563	1.149	

Данные об уровне накопления ТМ в мышцах рыб представлены в таблице 10. Содержание железа в мышцах ротана превышало более чем в 4.4 раза, а в плотве практически соответствовало величине допустимого уровня. Содержание свинца и кадмия в мышечной ткани обследуемых рыб не превышало величину допустимого уровня. Более высокие концентрации ТМ, за исключением железа, наблюдались в мышцах плотвы.

Таблица 10. Содержание тяжелых металлов в рыбе малой реки Ходца, мг/кг сырой массы.
Table 10. Heavy metals content in fish from the Khodtsa River, mg/kg of the wet weight,.

Элемент	Содержание ТМ в мышцах рыб		
	Среднее течение	Нижнее течение	Величина допустимого уровня
	Ротан	Плотва	
Pb	0.037±0.016	0.053±0.023	≤ 1.0
Cd	< 0.01	< 0.01	≤ 0.2
Fe	5.3±0.92	1.00±0.308	1.2
Zn	0.46±3.12	0.56±0.08	40
Cu	0.09±2.24	0.40±0.021	10

Для оценки интенсивности накоплении ТМ рассчитали коэффициенты биологического поглощения как отношения содержания элементов в мышцах рыб к их содержанию в воде и в донных отложениях (рис. 18-19).

По отношению к содержанию в воде наибольшими были коэффициенты биологического поглощения цинка как у плотвы, так и у ротана. По отношению к содержанию в донных отложениях наибольшим был коэффициент биологического поглощения кадмия у плотвы. Следует отметить, что в отличие от высшей водной растительности, КБП железа по отношению к его содержанию и в воде, и в донных отложениях у обоих видов рыб были наименьшими.

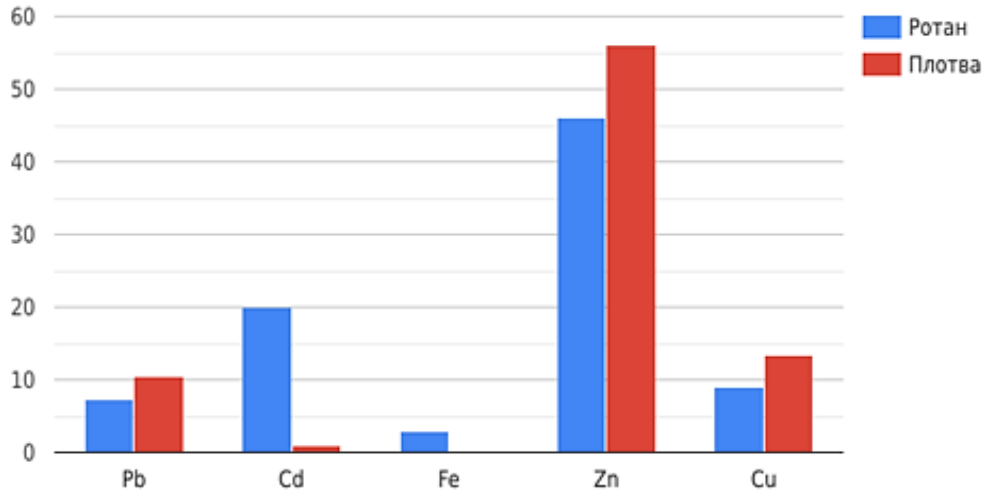

Рис. 18. КБП ТМ по отношению к их содержанию в воде. **Fig. 18.** Biological absorption coefficients of heavy metals in relation to their content in water.

Ряды КБП для мышечной ткани рыб по отношению к воде в порядке убывания выглядят следующим образом: для ротана – Zn > Cd > Cu > Pb > Fe, для плотвы – Zn > Cu > Pb > Cd > Fe. Ряды для мышечной ткани рыб по отношению к донным отложениям характеризуются следующей последовательностью: для ротана – Cd > Zn = Cu > Pb > Fe, для плотвы – Cd > Pb > Cu > Zn > Fe. Таким образом, более интенсивное поглощение ТМ изучаемыми видами рыб происходит из воды.

Как показали наши исследования, информационная эффективность геоэкологического мониторинга малых рек будет возрастать за счет включения таких компонентов водных

экосистем, как высшая водная растительность (осока водяная, ряска малая, их биопродуктивность), рыб (мышечные ткани плотвы и ротана), донных отложений и прибрежных грунтов. Сравнительный анализ концентраций поллютантов в компонентах экосистемы позволяет проследить трансформационные процессы по маркерным показателям в биогеохимической пищевой цепи. Установлено, что корни осоки водяной накапливают тяжелые металлы в десятки и сотни раз больше, чем побеги, это свидетельствует о буферных свойствах корневой системы гидрофитов, играющих критическую роль в водных экосистемах.

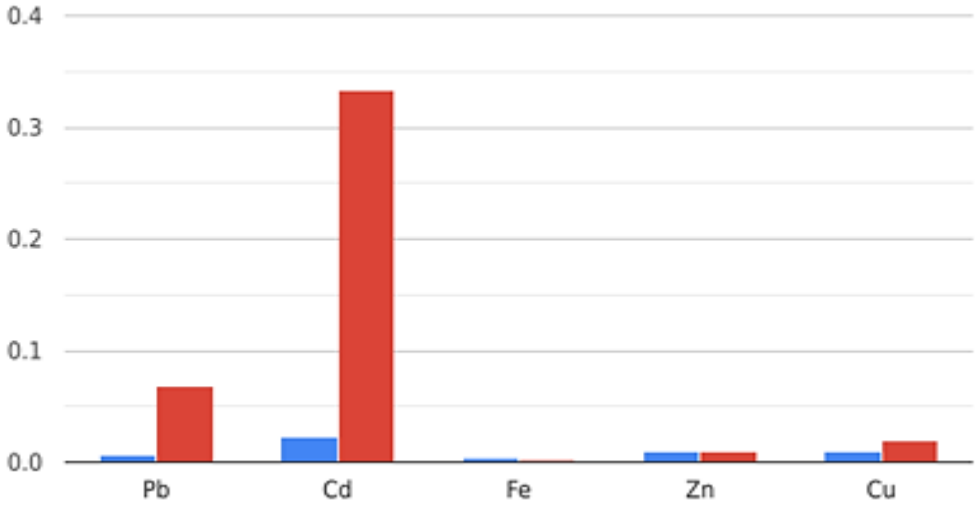

Рис. 19. КБП ТМ по отношению содержанию в воде к их содержанию в ДО. **Fig. 19.** Biological absorption coefficients of heavy metals in relation to their content in water to their content in sediments.

Зонирование реки Ходца по результатам химического загрязнения водной экосистемы тяжелыми металлами, нефтепродуктами, аммонийным азотом

Проведенные исследования по оценке загрязнения поллютантами компонентов водной экосистемы на разных участках р. Ходца позволяют провести ее зонирование, определить наиболее чувствительные зоны к аккумулированию поступающих в реку загрязняющих веществ и оценить опасность антропогенного воздействия ТМ.

Степень антропогенного воздействия на уровни содержания загрязняющих веществ в речных водах максимальна в межень, поэтому зонирование проводили по результатам химических анализов абиотических и биотических компонентов, отобранных в период летней межени. Поскольку на протяжении многолетних наблюдений за компонентами водной экосистемы реки мы выявили такие основные загрязнители, как железо, кадмий, свинец, аммонийный азот и нефтепродукты, то при зонировании реки мы учитывали содержание именно этих загрязнителей на разных участках по течению от истока до устья, чтобы сравнить степень загрязнения компонентов на разных расстояниях от источников загрязнения. На рисунках 20-24, составленных отдельно для каждого загрязняющего вещества, представлено содержание поллютанта в каждом компоненте водной экосистемы: воде, донных отложениях, береговом грунте, осоке (корни) в 3 местах отбора.

Содержание железа как в абиотических (вода, донные отложения, береговой грунт), так и в биотических (корни осоки) компонентах водной экосистемы имело тенденцию к уменьшению от истока к устью. Следует отметить, что в корнях осоки на всем протяжении накопление железа отличалось не так значительно, как в других компонентах (рис. 20).

В воде содержание кадмия было наименьшим в промежуточной точке, а содержание его в донных отложениях, береговом грунте и корнях осоки уменьшалось от истока к устью реки (рис. 21).

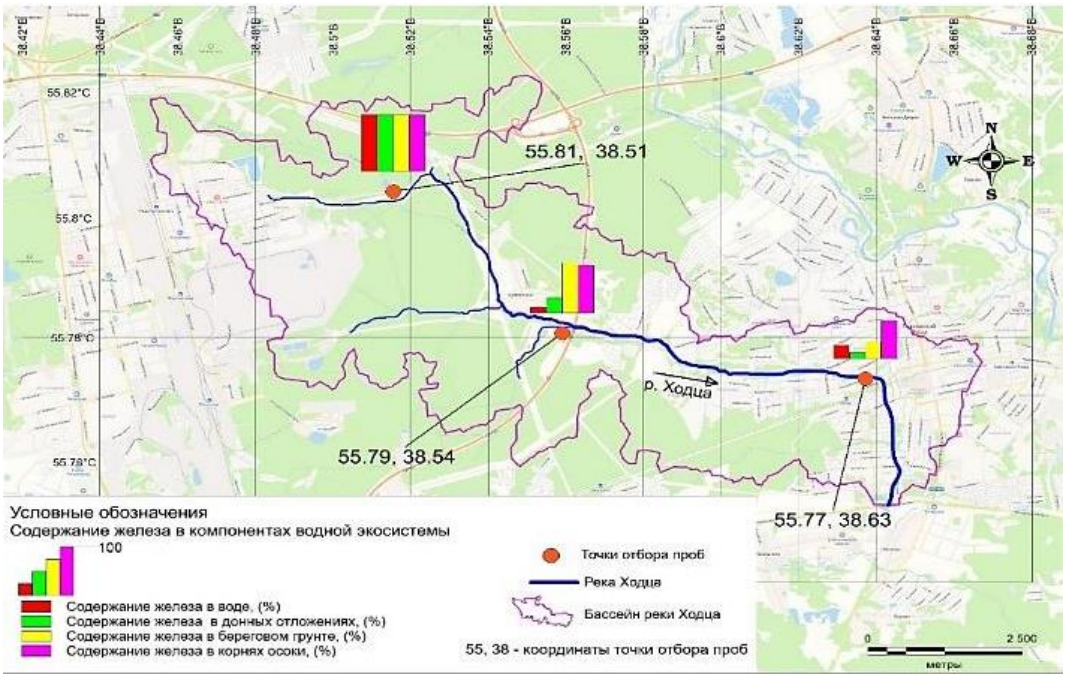

Рис. 20. Содержание Fe в компонентах водной экосистемы р. Ходца.
Fig. 20. Fe content in the components of the Khodtsa River aquatic ecosystem.

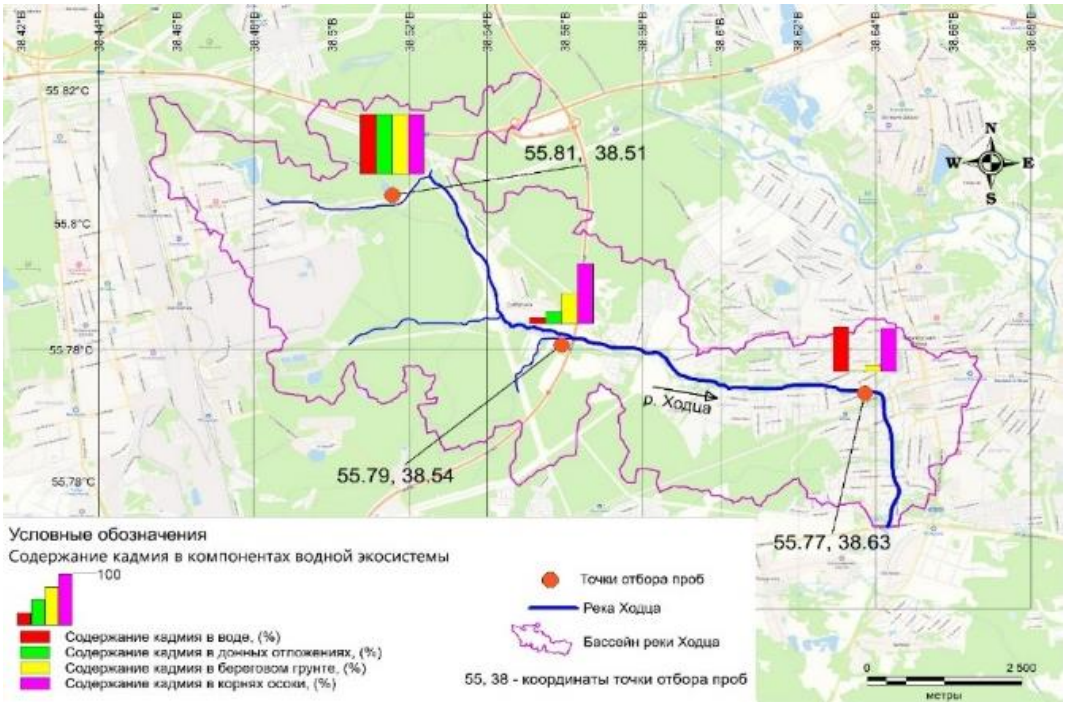

Рис. 21. Содержание Cd в компонентах водной экосистемы р. Ходца.
Fig. 21. Cd content in the components of the Khodtsa River aquatic ecosystem.

Содержание свинца в воде было наибольшим в истоке, а в промежуточной точке и устье его содержание было одинаковым и уменьшилось в 2 раза по сравнению с истоком. Содержание свинца в донных отложениях и корнях осоки постепенно уменьшалось от истока к устью (рис. 22).

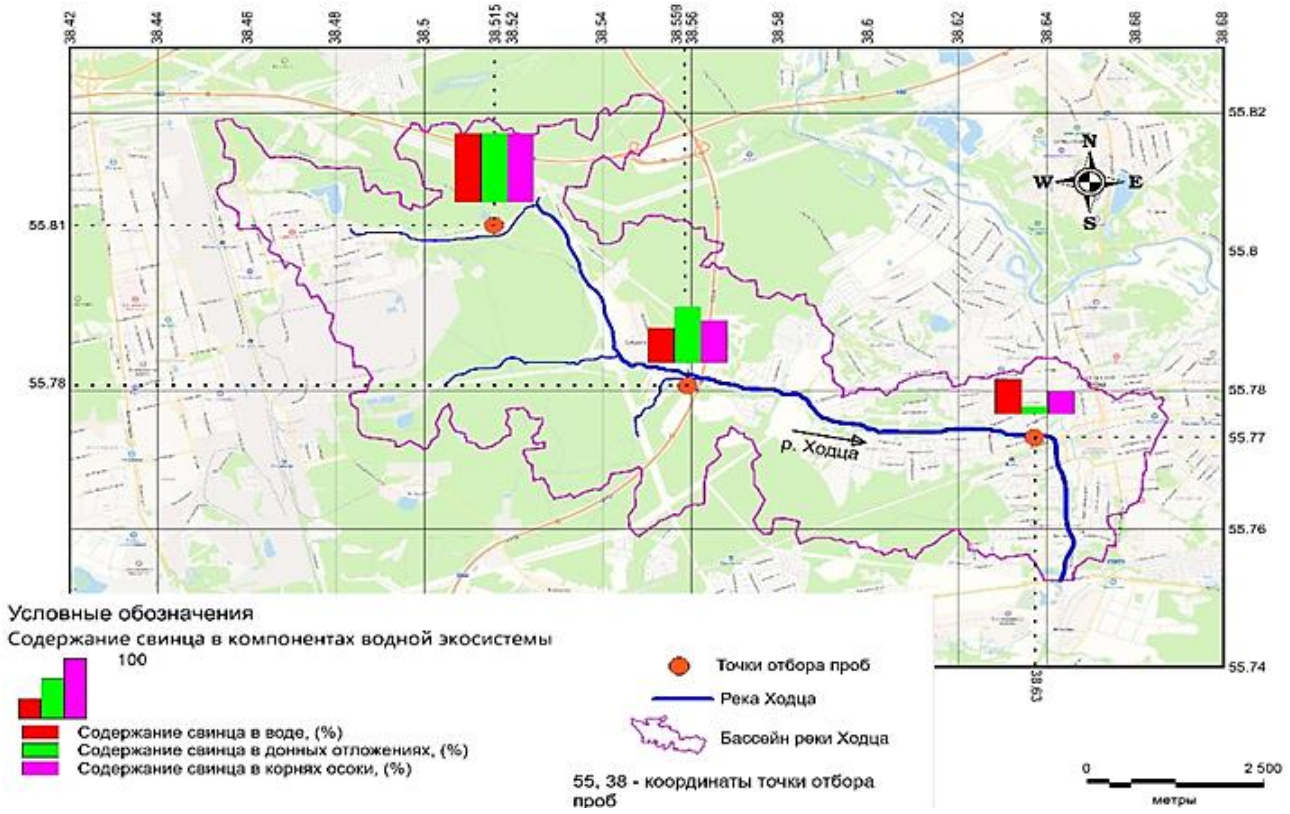

Рис. 22. Содержание Pb в компонентах водной экосистемы р. Ходца.
Fig. 22. Pb content in the components of the Khodtsa River aquatic ecosystem.

В воде содержание аммонийного азота было наибольшим в истоке, а в промежуточной точке и в устье оно значительно уменьшалось. В донных отложениях его содержание также уменьшалось от истока к устью. В береговом грунте его содержание имело тенденцию к снижению от истока до промежуточной точки и к увеличению от промежуточной точки к устью (рис. 23).

Содержание нефтепродуктов в абиотических компонентах водной экосистемы (вода, донные отложения, береговой грунт) имело тенденцию к уменьшению от истока к устью (рис. 24).

На представленных рисунках наглядно отражаются пространственные закономерности распределения загрязняющих веществ в поверхностной воде, донных отложениях, береговом грунте и корнях осоки водяной, что позволяет выявить зоны с более высокими уровнями их содержания. Таковыми зонами на реке Ходца являются верхнее и среднее течения, что указывает на значительный вклад в загрязнение коммунальных и промышленных стоков г. Электросталь. Полученные данные могут быть применены для усовершенствования мониторинга и фиторемедиации малых рек в районе действия промышленных предприятий.

В отличие от органических загрязняющих веществ, которые подвергаются процессам разложения, тяжелые металлы способны только к их перераспределению между отдельными компонентами водной экосистемы, хорошо аккумулируясь гидробионтами, особенно ВВР.

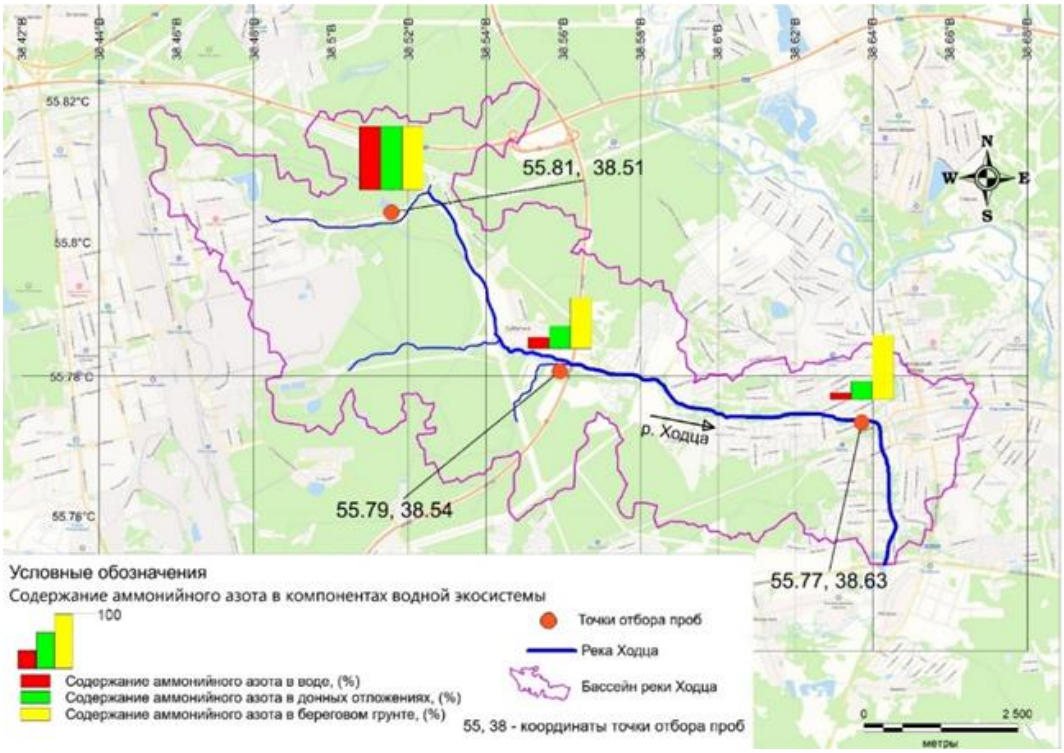

Рис. 23. Содержание аммонийного азота в компонентах водной экосистемы р. Ходца.
Fig. 23. NH_4^+ content in the components of the Khodtsa River aquatic ecosystem.

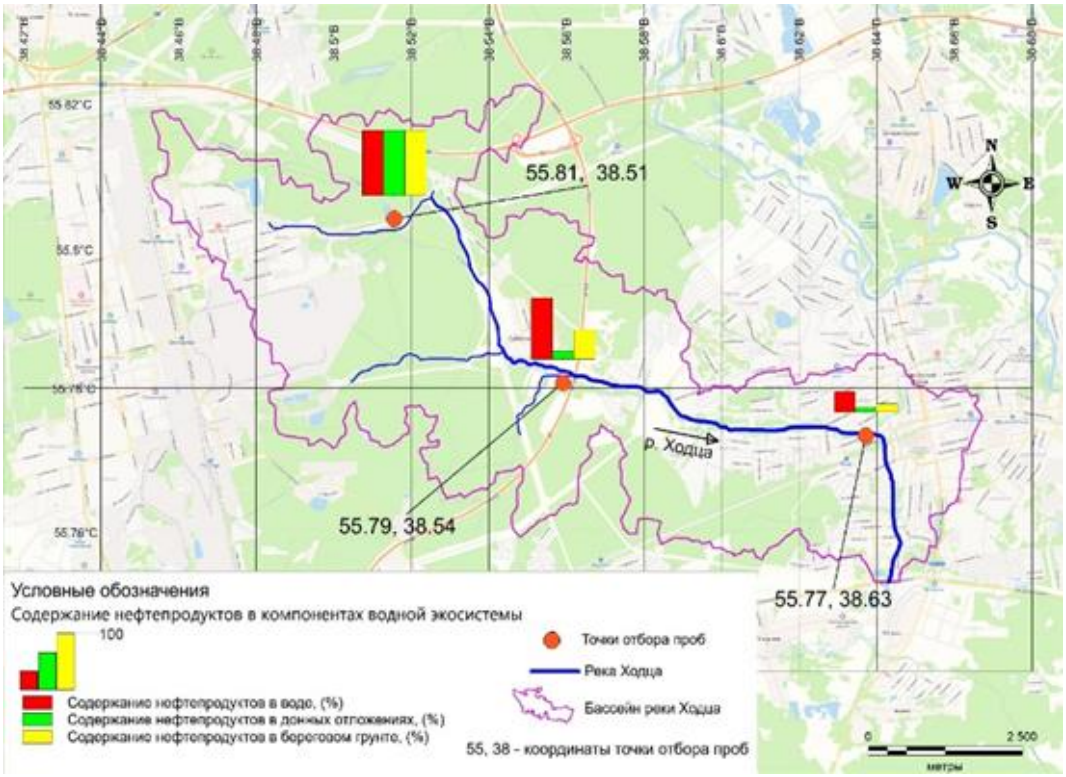

Рис. 24. Содержание нефтепродуктов в воде и береговом грунте р. Ходца.
Fig. 24. Oil products in the water and coastal soil of the Khodtsa River.

Таким образом, наиболее типичный вид высшей водной растительности – осока водяная, выявленная нами на исследованных участках р. Ходца и образующая сплошные заросли, а также ряска малая, могут являться основными факторами регулирования качества воды, поскольку в больших количествах поглощают и аккумулирует (особенно корни осоки) тяжелые металлы (свинец, кадмий, железо), способствуя очищению воды от токсичных элементов и исключая их из круговорота веществ.

Научная новизна проведенных нами исследований состоит в том, что впервые в практике геоэкологических исследований рассмотрена биогеохимическая пищевая цепь и предложено в качестве индикаторов экологического состояния использовать высшую водную растительность и фитотоксичность берегового грунта, что позволяет получить новые данные о состоянии компонентов водной экосистемы при техногенезе, а также повысить информативность мониторинга реки и подбирать наиболее подходящие для фиторемедиационных мероприятий по отношению к ТМ макрофиты. Впервые исследованы взаимодействия абиотических (вода, донные отложения, береговой грунт) и биотических (высшая водная растительность, рыба) компонентов водной экосистемы малой реки Ходца, в динамике проанализировано содержание загрязняющих веществ в них, что позволило установить экологическую ситуацию на всем протяжении реки. Выявлены пути и механизмы миграции Cu, Pb, Cd, Zn, Fe. Впервые определена токсичность воды р. Ходца с применением высшей водной растительности и рыб, а также фитотоксичность берегового грунта с помощью растительного тест-объекта – салата-латука.

Выявленные закономерности накопления и распределения тяжелых металлов в различных компонентах водной экосистемы реки, характеризующиеся различными уровнями загрязнения, вносят теоретический вклад в учение о миграции тяжелых металлов в системе «береговой грунт – вода – донные отложения – растения – рыбы». Полученные данные создают научную основу для оценки видов высших водных растений и рыб по толерантности к приоритетным токсичным химическим элементам и способности аккумулирования последних биомассой. Теоретическая значимость исследования определяется также разработкой эколого-токсикологического подхода к комплексной оценке загрязненности вредными веществами малых рек, опирающейся на совместное использование гидрохимических и гидробиологических показателей.

Исследованные закономерности взаимодействия абиотических и биотических компонентов водной экосистемы р. Ходца позволяют оценить происходящие в результате антропогенной нагрузки изменения в экологической ситуации на разных участках реки с использованием в качестве биомаркера корней осоки водяной как природных фильтров при накоплении ТМ. Установленные закономерности миграции тяжелых металлов в системе «вода – донные отложения – береговой грунт – высшая водная растительность – рыбы» могут быть применены для улучшения программы организации экологического мониторинга малых рек и стать основой прогноза последствий антропогенеза, а также для разработки мероприятий по восстановлению, охране и контролю состояния водной экосистемы в районе действия промышленных предприятий.

Являясь важным элементом информационной основы для осуществления государственного надзора и контроля над источниками загрязнения, полученные данные о фактическом качестве и загрязненности водной экосистемы малой реки Ходца необходимы для решения задач по оздоровлению данного водного объекта.

Выводы

1. Негативное влияние ливневых сточных вод от промышленных предприятий г. Электросталь Московской области отразилось на снижении качества поверхностной воды

малой реки Ходца, что проявлялось в превышении установленных нормативов в отдельные сроки исследования. По результатам химического анализа отбираемых проб воды в разных местах опробования по течению реки среди загрязняющих веществ преобладали железо, кадмий, свинец, аммонийный азот и нефтепродукты. В среднем за 2018-2020 годы концентрация железа в истоке составляла 18.47 мг/дм^3, в промежуточной точке – 1.76 мг/дм^3, в устье – 4.4 мг/дм^3; свинца в истоке – 0.016 мг/дм^3, в промежуточной точке и устье – 0.08 мг/дм^3; кадмия в истоке – 0.004 мг/дм^3, в промежуточной точке – 0.0004 мг/дм^3, в устье – 0.003 мг/дм^3. Содержание аммонийного азота в воде реки в истоке было 18.7 мг/дм^3, в промежуточной точке – 0.9 мг/дм^3, в устье – 0.37 мг/дм^3. Содержание нефтепродуктов в воде в истоке в разные периоды составляло 0.084 и 0.93 мг/дм^3, в промежуточной точке – 0.076 и 0.84 мг/дм^3, в устье – 0.011 и 0.12 мг/дм^3. Наблюдалась устойчивая тенденция более высокой концентрации загрязнителей в истоке и промежуточной точке.

2. В донных отложениях р. Ходца при определении гранулометрического состава в 3 створах, распределенных от истока до устья, установлено, что содержание глинистых частиц повышалось в среднем и нижнем течении. Изменчивость гранулометрического состава происходила как по длине реки, так и по её поперечному русловому профилю. Коэффициенты корреляции между содержанием физического песка, физической глины и содержанием ТМ указывают на среднюю отрицательную связь содержания кадмия и железа (R = –0.26) и слабую положительную – свинца (R = 0.18) с содержанием песчаной фракции и на среднюю положительную связь содержания кадмия и железа (R = 0.26) и слабую отрицательную – свинца (R = –0.18) с содержанием глинистой фракции. По сравнению с береговым грунтом донные отложения в значительно большей степени были загрязнены тяжелыми металлами в истоке и в промежуточной точке. Содержание аммонийного азота в донных отложениях превышало его содержание в береговом грунте более чем в 5 раз.

3. Мониторинг загрязнения ТМ берегового грунта, проведенный в 2023 году с применением салата-латука в качестве тест-объекта показал, что с увеличением уровня загрязнения ТМ уменьшалась всхожесть, длина корешков и проростков, а также общая биомасса тест-растения. Результаты определения загрязнения берегового грунта с помощью метода фитотоксичности подтвердились химическим методом анализа на ТМ. Так, в промежуточной точке содержание Fe составляло 4549.8 мг/кг, в устье – 2100.4 мг/кг, в истоке –1196.8 мг/кг; содержание Pb в промежуточной точке составляло 6.2 мг/г, в устье – 5.8 мг/кг, в истоке – 4.5 мг/кг; содержание Cd сохранялось на уровне 2019 года – < 0.5 мг/кг.

4. Выявлена изменчивость содержания ТМ в растениях осоки в пространстве в зависимости от их концентрации в воде и донных отложениях, причем наблюдался акропетальный характер распределения ТМ в растениях: корни накапливали Cd в 7.0-23.8, Pb – в 2.2-4.0, Fe – в 112.0-250.7 раза больше по сравнению с побегами, что, очевидно, и позволяет выживать осоке при экстремальной концентрации загрязнителей в водоеме. Корреляционный анализ зависимости содержания ТМ в ряске от концентрации ТМ в воде и донных отложениях показал на высокую положительную связь концентрации всех изучаемых ТМ в растениях ряски с их количеством в воде и донных отложениях.

5. Биологическая продуктивность высшей водной растительности, являющаяся одним из главных параметров при оценке загрязненности водоемов, увеличивалась по мере продвижения от истока к устью реки. Общая биомасса осоки в истоке составляла 250 г/м^2, в устье – 364 г/м^2; общая биомасса ряски в верхнем течении – 42.2 г/м^2, а в среднем течении – 48.7 г/м^2.

6. В ходе исследований выявлен сложный характер накопления ТМ в мышечной ткани исследуемых видов рыб р. Ходца. Содержание железа в мышечной ткани ротана более чем в 4 раза превышало величину допустимого уровня, а в мышечной ткани плотвы превышений

по железу не наблюдалось; содержание свинца и кадмия в мышечной ткани не превышало величину допустимого уровня. Коэффициенты биологического поглощения для мышечной ткани по отношению к воде в порядке убывания распределяются следующим образом: для ротана – Zn > Cd > Cu > Pb > Fe, для плотвы – Zn > Cu > Pb > Cd > Fe. КБП для мышечной ткани рыб по отношению к донным отложениям характеризуются следующей последовательностью: для ротана – Cd > Zn = Cu > Pb > Fe, для плотвы – Cd > Pb > Cu > Zn > Fe.

7. В ходе комплексной оценки загрязнения абиотических и биотических компонентов водной экосистемы реки выявлены зоны повышенного экологического риска в истоке и промежуточной точке, что указывает на значительный вклад в загрязнение коммунальных и промышленных стоков г. Электросталь.

8. Для установления загрязнения водной экосистемы реки тяжелыми металлами рекомендуется использовать в качестве биоиндикатора осоку водяную, которая также может применяться для фиторемедиации малых рек.

9. При мониторинге для наиболее быстрой и малозатратной оценки загрязнения реки тяжелыми металлами следует оценивать фитотоксичность берегового грунта с использованием тест-объекта, в качестве которого применяли салат-латук.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антипова М.А., Безденежных Н.А., Голицын М.С.* 2014. Система обеспечения качества анализа химического состава природных вод на современном этапе // Разведка и охрана недр. № 8. С. 51-54.
2. *Болгов М.В., Демин А.П.* 2018. Водохозяйственные и экологические проблемы нижней Волги и пути их решения // Водные ресурсы. Т. 45. № 2. С. 211-220.
3. *Болгов М.В., Левит-Гуревич Л.К.* 2013. Задачи и функции системы поддержки водохозяйственных решений по управлению водными ресурсами нижней Волги // Водные ресурсы. Т. 40. № 5. С. 544-553.
4. *Вернадский В.И. 1934*. Проблемы биогеохимии. Л.: АН СССР. 47 с.
5. *Вернадский В.И.* 1989. Биосфера и ноосфера. М.: Рольф. 261 с.
6. *Виноградов А.П.* 1935. Химический элементарный состав организмов и периодическая система Д.И. Менделеева // Труды биохимической лаборатории

REFERENCES

1. Antipova MA, Bezdeneshnykh NA, Golitsyn MS. Quality assurance system for analysis of chemical composition of natural waters at the current stage [Sistema obespecheniya kachestva analiza khimicheskogo sostava prirodnykh vod na sovremennom etape]. *Exploration and Protection of Subsoil [Razvedka i okhrana nedr]*. 2014;8:51-54.
2. Bolgov MV, Demin AP. Water-Management and Environmental Problems of the Lower Volga and Ways to Their Solution. *Water Resources.* 2018;45 (2):297-305.
3. Bolgov MV, Levit-Gurevich LK. Tasks and functions of a decision support system for water resources management in the Lower Volga. *Water Resources.* 2013;40 (5):544-553.
4. Vernadsky VI. Problems of biogeochemistry [*Problemy biogeokhimii*]. Leningrad: AN SSSR, 1934:47.
5. Vernadskii VI. Biosphere and noosphere [*Biosfera i noosfera*]. Moscow: Rol'f, 1989:261.
6. Vinogradov AP. Chemical elemental composition of organisms and D.I. Mendeleyev's periodic table [Khimicheskiy elementarnyy sostav organizmov i periodicheskaya sistema D.I. Mendeleyeva]. *Proc. of the Biochemical Laboratory of the USSR Academy of Sciences [Trudy biokhimicheskoy laboratorii AN SSSR]*. 1935;3:67-278.
7. Galitskaya PYu, Selivanovskaya SYu, Gumerova RKh. Testing waste, soils, and

АН СССР. Т. 3. С. 67-278.
7. *Галицкая П.Ю., Селивановская С.Ю., Гумерова Р.Х.* 2018. Тестирование отходов, почв, материалов с использование живых систем: учебно-методическое пособие. Казань: Казанский университет. 57 с.
8. *Григорьева И.Л.* 2014. Сравнительная гидрохимическая оценка современного состояния некоторых водных объектов верхней Волги // Водные ресурсы. Т. 41. № 3. С. 269-283.
9. *Гришанова Ю.С.* 2017. Районирование территории бассейна Оки по степени загрязненности речных вод // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития: тезисы докладов Всероссийской научной конференции, 20-22 марта 2017 г. М. С. 474-475.
10. ГН 2.1.7.2041-06. 2006. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве. М.: Роспотребнадзор. 16 с.
11. ГОСТ 12536-2014. 2019. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ. 18 с.
12. ГОСТ 17.1.5.01-80. 2002. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязнённость. М.: ИПК Изд-во стандартов. 7 с.
13. ГОСТ 17.1.5.05-85. 2010. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков. М.: Стандартинформ. 12 с.
14. ГОСТ 27753.8-88. 1989. Грунты

materials using living systems: a textbook-methodological manual [*Testirovaniye otkhodov, pochv, materialov s ispol'zovaniye zhivykh sistem: uchebno-metodicheskoye posobiye*]. Kazan: Kazanskiy universitet, 2018:57.
8. Grigorieva IL. Comparative hydrochemical assessment of the current state of some water bodies in the Upper Volga. *Water Resources.* 2014;41 (3):280-293.
9. Grishanova YuS. Zoning of the Oka River basin by the degree of river water pollution [*Rayonirovaniye territorii basseyna Oki po stepeni zagryaznennosti rechnykh vod*] *Monitoring the state and pollution of the environment [Monitoring sostoyaniya i zagryazneniya okruzhayushchey sredy] Main results and development paths [Osnovnyye rezul'taty i puti razvitiya] Abstracts of the All-Russian Scientific Conference,* March 20-22, 2017 *[Tezisy dokladov Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii]*. 2017:474-475.
10. Hygienic standards 2.1.7.2041-06 [*GN 2.1.7.2041-06*] *Maximum permissible concentrations (MPC) of chemicals in soil [Predel'no dopustimyye kontsentratsii (PDK) khimicheskikh veshchestv v pochve]*. Moscow: Rospotrebnadzor, 2006:16.
11. State standard 12536-2014 [*GOST 12536-2014*] *Soils [Grunty] Methods for laboratory determination of granulometric (grain) and microaggregate composition [Metody laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) i mikroagregatnogo sostava]*. Moscow: Standartinform, 2019:18.
12. State standard 17.1.5.01-80 [*GOST 17.1.5.01-80*] *Environmental protection [Okhrana prirody] Hydrosphere [Gidrosfera] General requirements for sampling bottom sediments of water bodies for pollution analysis [Obshchiye trebovaniya k otboru prob donnykh otlozheniy vodnykh ob"yektov dlya analiza na zagryaznonnost']*. Moscow: IPK Izd-vo standartov, 2002:7.
13. State standard 17.1.5.05-85 [*GOST 17.1.5.05-85*] *Environmental protection [Okhrana prirody] Hydrosphere [Gidrosfera] General requirements for sampling surface and sea waters, ice, and atmospheric precipitation [Obshchiye trebovaniya k otboru prob poverkhnostnykh i morskikh vod, l'da i atmosfernykh osadkov]*. Moscow: Standartinform, 2010:12.
14. State standard 27753.8-88 [*GOST 27753.8-88*]

тепличные. Метод определения аммонийного азота. М.: Изд-во стандартов. 6 с.
15. ГОСТ 27988-88. 2010. Семена масличные. Методы определения цвета и запаха. М.: Стандартинформ. 3 с.
16. ГОСТ 30178-96. 2010. Сырье и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов. М.: Стандартинформ. 10 с.
17. ГОСТ 30692-2000. 2002. Корма, комбикорма, комбикормовое сырье. Атомно-абсорбционный метод определения содержания меди, свинца, цинка и кадмия. М.: ИПК Изд-во стандартов. 19 с.
18. *Давыдов Л.К.* 1973. Общая гидрология. Л.: Гидрометеоиздат. 463 с.
19. *Даувальтер В.А., Кашулин Н.А., Сандимиров С.С.* 2012. Тенденции изменений химического состава донных отложений пресноводных субарктических и арктических водоемов под влиянием природных и антропогенных факторов // Труды КНЦ РАН. Прикладная экология Севера. Вып. 1. № 2 (9). С. 54-87.
20. *Дебольский В.К., Григорьева И.Л., Комиссаров А.Б.* 2011. Изменение химического состава воды в Волге от истока к устью в летнюю межень 2009 г. // Охрана окружающей среды и природопользование. № 3. С. 68-73.
21. *Джамалов Р.Г., Никаноров А.М., Решетняк О.С., Сафронова Т.И.* 2017. Воды бассейна Оки: химический состав и источники загрязнения // Вода и экология. № 3. С. 114-132.
22. *Джамалов Р.Г.* 2019. Пространственно-временной анализ гидрохимического состава и загрязнения вод в бассейне

Greenhouse soils [Grunty teplichnyye] Method for determining ammonium nitrogen [Metod opredeleniya ammoniynogo azota]. Moscow: Izd-vo standartov, 1989:6.
15. State standard 27988-88 [*GOST 27988-88*] *Oilseeds [Semena maslichnyye] Methods for determining color and odor [Metody opredeleniya tsveta i zapakha]*. Moscow: Standartinform, 2010:3.
16. State standard 30178-96 [*GOST 30178-96*] *Food raw materials and products [Syr'ye i produkty pishchevyye] Atomic absorption method for determining toxic elements [Atomno-absorbtsionnyy metod opredeleniya toksichnykh elementov]*. Moscow: Standartinform, 2010:10.
17. State standard 30692-2000 [*GOST 30692-2000*] *Feed, compound feed, compound feed raw materials [Korma, kombikorma, kombikormovoye syr'ye] Atomic absorption method for determining copper, lead, zinc, and cadmium content [Atomno-absorbtsionnyy metod opredeleniya soderzhaniya medi, svintsa, tsinka i kadmiya]*. Moscow: IPK Izd-vo standartov, 2002:19.
18. Davydov LK. General hydrology [*Obshchaya gidrologiya*]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1973:463.
19. Dauvalter VA, Kashulin NA, Sandimirov SS. Trends in changes in the chemical composition of bottom sediments of freshwater subarctic and arctic reservoirs under the influence of natural and anthropogenic factors [Tendentsii izmeneniy khimicheskogo sostava donnykh otlozheniy presnovodnykh subarkticheskikh i arkticheskikh vodoyemov pod vliyaniyem prirodnykh i antropogennykh faktorov]. *Proc. of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences [Trudy KNTS RAN] Applied Ecology of the North [Prikladnaya ekologiya Severa]*. 2012;2 (9):54-87.
20. Debolsky VK, Grigorieva IL, Komissarov AB. Changes in the chemical composition of the Volga water from its source to mouth during the summer low water in 2009 [Izmeneniye khimicheskogo sostava vody v Volge ot istoka k ust'yu v letnyuyu mezhen' 2009 g.]. *Environmental Protection and Nature Management [Okhrana okruzhayushchey sredy i prirodopol'zovaniye]*. 2011;3:68-73.
21. Dzhamalov RG, Nikanorov AM, Reshetnyak OS, Safronova TI. Waters of the Oka River basin: chemical composition and pollution sources [Vody basseyna Oki: khimicheskiy sostav i istochniki

Северной Двины // Водные ресурсы. Т. 46. № 2. С. 149-160.
23. *Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т.* 2004. Экологическое нормирование и устойчивость природных экосистем: учебное пособие. СПб. 265 с.
24. *Злывко А.С.* 2013. Исследование загрязнения и самоочищающей способности малых водотоков урбанизированных территорий. Автореф. дис. … канд. биол. наук. Владимир. 23 с.
25. *Зилов Е.А.* 2013. Водные ресурсы и устойчивое развитие человечества: международное сотрудничество в рациональном использовании ресурсов пресноводных озер (по материалам зарубежных исследований) // Водные ресурсы. Т. 40. № 1. С. 95-108.
26. *Зубкова В.М., Арсланбекова Ф.Ф., Макаханюк Ж.С.* 2021. Накопление тяжелых металлов (ТМ) ряской малой (*Lemna minor*) в условиях антропогенного загрязнения реки Ходца // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия «Естественные и технические науки». № 7. С. 23-28.
27. *Кабата-Пендиас А.* 1989. Микроэлементы в почвах и растениях. М.: Мир. 439 с.
28. *Канбетов А.Ш., Куанышева Г.А.* 2012. Гидролого-гидрохимический режим и токсикологическое состояние реки Урал в 2011 году // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия «Рыбное хозяйство». № 2. С. 41-45.
29. *Левшаков Л.В.* 2011. Нормирование содержания тяжёлых металлов в почве // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии.

zagryazneniya]. *Water and Ecology [Voda i ekologiya]*. 2017;3:114-132.
22. Dzhamalov RG. Space–Time Analysis of Hydrochemical Composition and Pollution of Water in the Northern Dvina Basin. *Water Resources.* 2019;46 (2):188-198.
23. Dmitriev VV, Frumin GT. Environmental regulation and sustainability of natural ecosystems: a tutorial [*Ekologicheskoye normirovaniye i ustoychivost' prirodnykh ekosistem: uchebnoye posobiye*]. Saint-Petersburg, 2004:265.
24. Zlyvko AS. Study of pollution and self-purifying capacity of small watercourses in urbanized areas [*Issledovaniye zagryazneniya i samoochishchayushchey sposobnosti malykh vodotokov urbanizirovannykh territoriy*]. *Abstract of PhD in Biology.* Vladimir, 2013:23.
25. Zilov EA. Water resources and the sustainable development of humankind: International cooperation in the rational use of freshwater-lake resources: Conclusions from materials of foreign studies. *Water Resources.* 2013;40 (1):84-95.
26. Zubkova VM, Arslanbekova FF, Makakhanyuk ZhS. Accumulation of heavy metals (HM) by duckweed (Lemna minor) under conditions of anthropogenic pollution of the Khodtsa River [Nakopleniye tyazhelykh metallov (TM) ryaskoy maloy (Lemna minor) v usloviyakh antropogennogo zagryazneniya reki Khodtsa]. *Modern Science: Current Problems of Theory and Practice [Sovremennaya nauka: aktual'nyye problemy teorii i praktiki] Series "Natural and Technical Sciences" [Seriya "Yestestvennyye i tekhnicheskiye nauki"]*. 2021;7:23-28.
27. Kabata-Pendias A. Microelements in soils and plants [*Mikroelementy v pochvakh i rasteniyakh*]. Moscow: Mir, 1989:439.
28. Kanbetov ASh, Kuanysheva GA. Hydrological and hydrochemical regime and toxicological state of the Ural River in 2011 [Gidrologo-gidrokhimicheskiy rezhim i toksikologicheskoye sostoyaniye reki Ural v 2011 godu]. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University [Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta] Series "Fisheries" [Seriya "Rybnoye khozyaystvo"]*. 2012;2:41-45.
29. Levshakov LV. Standardization of heavy metal content in soil [Normirovaniye soderzhaniya

№ 3. С. 51-53.
30. М-МВИ-80-2008. 2008. Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектрометрии. СПб.: Мониторинг. 36 с.
31. *Михалевская-Целуйко В.С.* 2006. Оценка загрязнения воды рек бассейна верхней Оки на урбанизированных территориях (на примере Калужской области). Автореф. дис. … канд. геогр. наук. Калуга. 32 с.
32. *Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А.* 2007. Распределение микроэлементов в поверхностных водах суши и особенности их водной миграции // Водные ресурсы. Т. 34. № 4. С. 454-468.
33. *Мурашко Ю.А., Кравченко И.В*. 2017. Содержание тяжелых металлов в осоке водяной (*Carex aquatilis wahlenb*) прибрежно-водных биоценозов природного парка «Нумто» // Вестник КрасГАУ. Серия «Биологические науки». № 8. С. 104-110.
34. *Никаноров А.М., Брызгало В.А., Косменко Л.С., Кондакова М.Ю., Решетняк О.С.* 2010. Роль речного притока растворенных химических веществ в антропогенной изменчивости состояния водной среды устьевой области реки Волга // Вода: химия и экология. № 7. С. 6-12.
35. Об утверждении Нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. 2017. Приказ от 13.12.2016 № 552 (с изм. на

tyazholykh metallov v pochve]. *Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy [Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii]*. 2011;3:51-53.
30. M-MVI-80-2008. Methodology for measuring the mass fraction of elements in soil, ground, and bottom sediment samples using atomic emission and atomic absorption spectrometry [*Metodika vypolneniya izmereniy massovoy doli elementov v probakh pochv, gruntov i donnykh otlozheniyakh metodami atomno-emissionnoy i atomno-absorbtsionnoy spektrometrii*]. Saint-Petersburg: Monitoring, 2008:36.
31. Mikhalevskaya-Tseluyko VS. Assessment of water pollution in the rivers of the Upper Oka basin in urbanized areas (using the Kaluga Region as an example) [*Otsenka zagryazneniya vody rek basseyna verkhney Oki na urbanizirovannykh territoriyakh (na primere Kaluzhskoy oblasti)]. Abstract of PhD in Geography*. Kaluga, 2016:32.
32. Moiseenko TI, Gashkina NA. The distribution of trace elements in surface continental waters and the character of their migration in water. *Water Resources.* 2007;34 (4):423-437.
33. Murashko YuA, Kravchenko IV. Content of heavy metals in water sedge (Carex aquatilis wahlenb) of coastal aquatic biocenoses of the Numto Nature Park [Soderzhaniye tyazhelykh metallov v osoke vodyanoy (Sarex aquatilis wahlenb) pribrezhno-vodnykh biotsenozov prirodnogo parka "Numto"]. *Bulletin of the Krasnoyarsk State Agrarian University [Vestnik KrasGAU] Series "Biological Sciences" [Seriya Biologicheskiye nauki]*. 2017;8:104-110.
34. Nikanorov AM, Bryzgalo VA, Kosmenko LS, Kondakova MYu, Reshetnyak OS. The role of river influx of dissolved chemicals in anthropogenic variability of the state of the aquatic environment of the Volga River estuary [Rol' rechnogo pritoka rastvorennykh khimicheskikh veshchestv v antropogennoy izmenchivosti sostoyaniya vodnoy sredy ust'yevoy oblasti reki Volga]. *Water: Chemistry and Ecology [Voda: khimiya i ekologiya]*. 2010;7:6-12.
35. On approval of the Water quality standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance [*Ob utverzhdenii Normativov kachestva*

22.08.2023). 153 с.
36. Об утверждении Правил приема сточных вод в систему канализации и на сооружения биологической очистки сточных вод, расположенные в городском округе Павловский Посад Московской области. 2017. Решение Совета департамента г.о. Павловский Посад МО от 29.12.2017, № 188/16. 17 с.
37. О внесении изменения в положение об осуществлении государственного мониторинга водных объектов. 2011. Постановление Правительства РФ от 13.07.2011, № 572 [Электронный ресурс https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_116825 (дата обращения 06.09.2025)].
38. Отчет по экологической безопасности ПАО «Машиностроительный завод». 2015 [Электронный ресурс: https://xn----btb4bfrm9d.xn--p1ai/upload/iblock/b85/b85b28d45c03f87adfe8336bd0c3d0dd.pdf (дата обращения 06.09.2025)].
39. Отчет по экологической безопасности ПАО «Машиностроительный завод». 2016 [Электронный ресурс https://docplayer.com/72490082-Otchet-po-ekologicheskoy-bezopasnosti-za-2016-god.html (дата обращения 06.09.2025)].
40. Отчет по экологической безопасности ПАО «Машиностроительный завод». 2017 [Электронный ресурс http://www.elemash.ru/upload/files/Ecology-2017_.pdf (дата обращения 06.09.2025)].
41. Отчет по экологической безопасности ПАО «Машиностроительный завод». 2018 [Электронный ресурс http://www.elemash.ru/upload/files/

vody vodnykh ob"yektov rybokhozyaystvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimykh kontsentratsiy vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob"yektov rybokhozyaystvennogo znacheniya]. Order of 13/12/2016, No. 552 (as amended on 22/08/2023). 2017:153.
36. On approval of the Rules for the reception of wastewater into the sewerage system and biological wastewater treatment facilities located in the urban district of Pavlovsky Posad, Moscow Region [*Ob utverzhdenii Pravil priyema stochnykh vod v sistemu kanalizatsii i na sooruzheniya biologicheskoy ochistki stochnykh vod, raspolozhennyye v gorodskom okruge Pavlovskiy Posad Moskovskoy oblasti*]. Decision of the Council of Department of the Urban District of Pavlovsky Posad, Moscow Region of 29/12/2017, No. 188/16. 2017:17.
37. On amending the regulation on the implementation of state monitoring of water bodies [*O vnesenii izmeneniya v polozheniye ob osushchestvlenii gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob"yektov*]. Decision of the Government of the Russian Federation dated 13/07/2011, No. 572. 2011, Available at https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_116825 (Date of Access 06/09/2025).
38. Environmental Safety Report of PJSC Machine-Building Plant [*Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti PAO "Mashinostroitel'nyy zavod"*]. 2015, Available at https://xn----btb4bfrm9d.xn--p1ai/upload/iblock/b85/b85b28d45c03f87adfe8336bd0c3d0dd.pdf (Date of Access 06/09/2025).
39. Environmental Safety Report of PJSC Machine-Building Plant [*Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti PAO "Mashinostroitel'nyy zavod"*]. 2016, Available at https://docplayer.com/72490082-Otchet-po-ekologicheskoy-bezopasnosti-za-2016-god.html (Date of Access 06/09/2025).
40. Environmental Safety Report of PJSC Machine-Building Plant [*Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti PAO "Mashinostroitel'nyy zavod"*]. 2017, Available at http://www.elemash.ru/upload/files/Ecology-2017_.pdf (Date of Access 06/09/2025).
41. Environmental Safety Report of PJSC Machine-Building Plant [*Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti PAO "Mashinostroitel'nyy zavod"*].

OEB_2018.pdf (дата обращения 06.09.2025)].
42. Отчет по экологической безопасности ПАО «Машиностроительный завод». 2019 [Электронный ресурс https://rosatom.ru/upload/iblock/082/0820303ae1d84f45b46df16535f7b434.pdf (дата обращения 06.09.2025)].
43. Отчет по экологической безопасности ПАО «Машиностроительный завод». 2020 [Электронный ресурс https://rosatom.ru/upload/iblock/7aa/7aa7064cbc49957cdd2de2ff5c9d6c9f.pdf (дата обращения 06.09.2025)].
44. Отчет по экологической безопасности АО «Машиностроительный завод». 2021 [Электронный ресурс https://rosatom.ru/upload/iblock/7cc/7cca6e0f5300cdc7d866c4884719b239.pdf (дата обращения 06.09.2025)].
45. Отчет по экологической безопасности АО «Машиностроительный завод». 2022 [Электронный ресурс http://www.elemash.ru/upload/files/Ecology_bucklet_MSZ-2022.pdf (дата обращения 06.09.2025)].
46. ПНД Ф 14.1:2:4.135-98. 1998. Количественный химический анализ вод. Методика выполнения измерений массовой концентрации элементов в пробах питьевой, природных, сточных вод и атмосферных осадков методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. М. 27 с.
47. *Попов Н.С., Святенко А.В., Киреев Е.И*. 2013. Классификация методов контроля качества природных вод // Вопросы современной науки и практики. № 3 (47). С. 245-261.

2018, Available at http://www.elemash.ru/upload/files/OEB_2018.pdf (Date of Access 06/09/2025).
42. Environmental Safety Report of PJSC Machine-Building Plant [*Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti PAO "Mashinostroitel'nyy zavod"*]. 2019, Available at https://rosatom.ru/upload/iblock/082/0820303ae1d84f45b46df16535f7b434.pdf (Date of Access 06/09/2025).
43. Environmental Safety Report of PJSC Machine-Building Plant [*Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti PAO "Mashinostroitel'nyy zavod"*]. 2020, Available at https://rosatom.ru/upload/iblock/7aa/7aa7064cbc49957cdd2de2ff5c9d6c9f.pdf (Date of Access 06/09/2025).
44. Environmental Safety Report of JSC Machine-Building Plant [*Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti PAO "Mashinostroitel'nyy zavod"*]. 2021, Available at https://rosatom.ru/upload/iblock/7cc/7cca6e0f5300cdc7d866c4884719b239.pdf (Date of Access 06/09/2025).
45. Environmental Safety Report of JSC Machine-Building Plant [*Otchet po ekologicheskoy bezopasnosti PAO "Mashinostroitel'nyy zavod"*]. 2022, Available at http://www.elemash.ru/upload/files/Ecology_bucklet_MSZ-2022.pdf (Date of Access 06/09/2025).
46. Federal environmental regulations 14.1:2:4.135-98 [*PND F 14.1:2:4.135-98*] *Quantitative chemical analysis of water [Kolichestvennyy khimicheskiy analiz vod] Methodology for measuring the mass concentration of elements in samples of drinking, natural, wastewater, and atmospheric precipitation using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry [Metodika vypolneniya izmereniy massovoy kontsentratsii elementov v probakh pit'yevoy, prirodnykh, stochnykh vod i atmosfernykh osadkov metodom atomno-emissionnoy spektrometrii s induktivno svyazannoy plazmoy]*. Moscow, 1998:27.
47. Popov NS, Svyatenko AV, Kireev EI. Classification of methods for monitoring the quality of natural waters [Klassifikatsiya metodov kontrolya kachestva prirodnykh vod]. *Issues of Modern Science and Practice [Voprosy sovremennoy nauki i praktiki]*. 2013;3 (47):245-261.

48. Проект нормативов предельно-допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу ОАО «Павловопосадская платочная мануфактура». 2017 [Электронный ресурс https://e-ecolog.ru/reestr/doc/1185824 (дата обращения 06.09.2025)].
49. *Розенберг Г.С., Евланов И.А., Селезнев В.А., Минеев А.К., Селезнёва А.В., Шитиков В.К.* 2011. Опыт экологического нормирования антропогенного воздействия на качество воды (на примере водохранилища Средней и Нижней Волги) // Вопросы экологического нормирования и разработка системы оценки состояния водоемов. Материалы Объединенного пленума научного совета ОБН РАН по гидробиологии и ихтиологии, Гидробиологического общества при РАН и Межведомственной ихтиологической комиссии, 30 марта 2011 г., г. Москва. М.: Тов-во научных изданий КМК. С. 5-29.
50. СанПиН 2.1.5.980-00. 2000. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. М.: Минздрав России. 18 с.
51. СанПиН 1.2.3685-21. 2021. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М. 990 с.
52. *Свистова И.Д.* 2019. Методические подходы к определению фитотоксической активности почвы и почвенных микроорганизмов // Лесотехнический журнал. Т. 9. № 2 (34). С. 40-46.
53. *Селезнева А.В.* 2003. Антропогенная нагрузка на реки от точечных источников

48. Draft standards for maximum permissible emissions of pollutants into the atmosphere of Pavlovo Posad Shawl Manufactory OJSC [*Proyekt normativov predel'no-dopustimykh vybrosov zagryaznyayushchikh veshchestv v atmosferu OAO "Pavlovoposadskaya platochnaya manufaktura"*]. 2017, Available at https://e-ecolog.ru/reestr/doc/1185824 (Date of Access 06/09/2025).
49. Rosenberg GS, Evlanov IA, Seleznev VA, Mineev AK, Selezneva AV, Shitikov VK. Experience in environmental regulation of anthropogenic impact on water quality (on the example of the Middle and Lower Volga reservoir) [*Opyt ekologicheskogo normirovaniya antropogennogo vozdeystviya na kachestvo vody (na primere vodokhranilishcha Sredney i Nizhney Volgi)*] *Issues of environmental regulation and development of a system for assessing the state of water bodies [Voprosy ekologicheskogo normirovaniya i razrabotka sistemy otsenki sostoyaniya vodoyemov] Proc. of the Joint Plenum of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Hydrobiology and Ichthyology, the Hydrobiological Society of the Russian Academy of Sciences, and the Interdepartmental Ichthyological Commission,* March 30, 2011, Moscow *[Materialy Ob"yedinennogo plenuma nauchnogo soveta OBN RAN po gidrobiologii i ikhtiologii, Gidrobiologicheskogo obshchestva pri RAN i Mezhvedomstvennoy ikhtiologicheskoy komissii]*. Moscow: Tov-vo nauchnykh izdaniy KMK, 2011:5-29.
50. Sanitary rules and regulations 2.1.5.980-00 [*SanPiN 2.1.5.980-00*] *Hygienic requirements for surface water protection [Gigiyenicheskiye trebovaniya k okhrane poverkhnostnykh vod]*. Moscow: Minzdrav Rossii, 2000:18.
51. Sanitary rules and regulations 1.2.3685-21 [*SanPiN 1.2.3685-21*] Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans [*Gigiyenicheskiye normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya*]. Moscow, 2021:990.
52. Svistova ID. Methodological approaches to determining the phytotoxic activity of soil and soil microorganisms [Metodicheskiye podkhody k

загрязнения // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 5. № 2. С. 268-277.

54. Схема водоснабжения и водоотведения городского округа Электросталь Московской области на период до 2030 года. 2016 [Электронный ресурс: https://electrostal.ru/upload/1/37104a26ac-kniga1vodosnabzenieelektrostal.pdf (дата обращения 06.09.2025)].
55. *Теппер Е.З., Шильникова В.К., Переверзева Г.И.* 1993. Практикум по микробиологии. М.: Колос. 170 с.
56. ТР ТС 021/2011. 2011. Технический регламент Таможенного союза. О безопасности пищевой продукции. М.: АО «Кодекс». 287 с.
57. *Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О., Кизицкий Р.М.* 2000. Теоретические аспекты связи метаногенеза с загрязнением воды и донных отложений веществами неорганической и органической природы // Известия высших учебных заведений. Серия «Естественные науки». № 4. С. 72-77.
58. *Федорук Н.А., Галицкая И.В*. 2021. Анализ загрязняющих компонентов в жидкой фазе снега на территории правого берега г. Дубны в 2020 г. // Вестник Международного университета природы, общества и человека «Дубна». Серия «Естественные и инженерные науки». № 2 (47). С. 44-50 [Электронный ресурс https:ein.uni-dubna.ru/index.php/ein/article/view/44 (дата обращения 06.09.2025)].
59. *Хаустов А.П., Редина М.М., Косткина А.Д.* 2015. Донные отложения как неравновесная гидрохимическая система:

opredeleniyu fitotoksicheskoy aktivnosti pochvy i pochvennykh mikroorganizmov]. *Forestry Management Journal [Lesotekhnicheskiy zhurnal]*. 2019;9 (2):40-46.

53. Selezneva AV. Anthropogenic load on rivers from point sources of pollution [Antropogennaya nagruzka na reki ot tochechnykh istochnikov zagryazneniya]. *Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences [Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN]*. 2003;5 (2):268-277.
54. Water supply and sanitation scheme for the urban district of Elektrostal, Moscow Region for the period up to 2030 [*Skhema vodosnabzheniya i vodootvedeniya gorodskogo okruga Elektrostal' Moskovskoy oblasti na period do 2030 goda*]. 2016, Available at https://electrostal.ru/upload/1/37104a26ac-kniga1vodosnabzenieelektrostal.pdf (Date of Access 06/09/2025).
55. Tepper EZ, Shilnikova VK, Pereverzeva GI. Microbiology workshop [*Praktikum po mikrobiologii*]. Moscow: Kolos. 1993:170.
56. Technical Regulations of the Customs Union 021/201 [*TR TS 021/2011*] *On food safety [O bezopasnosti pishchevoy produktsii]*. Moscow: JSC "Kodeks", 2011:287.
57. Fedorov YuA, Tambieva NS, Garkusha DN, Khoroshevskaya VO, Kizitsky RM. Theoretical aspects of the relationship between methanogenesis and pollution of water and bottom sediments by inorganic and organic substances [Teoreticheskiye aspekty svyazi metanogeneza s zagryazneniyem vody i donnykh otlozheniy veshchestvami neorganicheskoy i organicheskoy prirody]. *News of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy] "Natural Sciences" Series [Seriya "Yestestvennyye nauki"]*. 2000;4:72-77.
58. Fedoruk NA, Galitskaya IV. Analysis of pollutant components in the liquid phase of snow on the right bank of the Dubna River in 2020 [Analiz zagryaznyayushchikh komponentov v zhidkoy faze snega na territorii pravogo berega g. Dubny v 2020 g.]. *Bulletin of the International University of Nature, Society and Man "Dubna" [Vestnik Mezhdunarodnogo universiteta prirody, obshchestva i cheloveka "Dubna"] Series "Natural and Engineering Sciences" [Seriya*

интерпретация на основе маркерных соотношений ПАУ // Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод: материалы научной конференции, 8-10 сентября 2015 г. Ч. 2. Ростов-на-Дону. С. 327-331.

60. *Цаценко Л.В., Пасхалиди В.Г.* 2018. Рясковые как модельный объект в биотестировании водной и почвенной среды // Масличные культуры. Вып. 4 (176). С. 146-151.
61. Coping with Water Scarcity – Challenge of the Twenty-First Century. 2007. Rome: FAO. 29 p.
62. *Freedman B.* 1989. Environmental Ecology: The Impacts of Pollution and Other Stresses on Ecosystem Structure and Function. London: Academic Press. Vol. 4 (2). P. 168-169.
63. Google.Maps. 2025 [Электронный ресурс https://www.google.com/maps (дата обращения 06.09.2025)].
64. *Hakanson L.* 1980. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control – a Sedimentological Approach // Water Resources. Vol. 14. P. 975-1001.
65. *Smith V.K., William H.D.* 1986. Measuring Water Quality Benefits. Boston: Kluwer-Nijhoff Publishing. 328 p.

"Yestestvennyye i inzhenernyye nauki"]. 2021;2 (47):44-50, Available at https: ein.uni-dubna.ru/index.php/ein/article/view/44 (Date of Access 06/09/2025).

59. Khaustov AP, Redina MM, Kostkina AD. Bottom sediments as a nonequilibrium hydrochemical system: interpretation based on PAH marker ratios [*Donnyye otlozheniya kak neravnovesnaya gidrokhimicheskaya sistema: interpretatsiya na osnove markernykh sootnosheniy PAU*] *Modern problems of hydrochemistry and monitoring of surface water quality [Sovremennyye problemy gidrokhimii i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod] Proc. of the scientific conference*, Pt. 2, September 8-10, 2015 *[Materialy nauchnoy konferentsii]*. Rostov-on-Don, 2015:327-331.
60. Tsatsenko LV, Paskhalidi VG. Duckweed as a model object in biotesting of aquatic and soil environments [Ryaskovyye kak model'nyy ob"yekt v biotestirovanii vodnoy i pochvennoy sredy]. *Oilseed Crops [Maslichnyye kul'tury]*. 2018;4 (176):146-151.
61. Coping with Water Scarcity – Challenge of the Twenty-First Century. Rome: FAO, 2007:29.
62. Freedman B. Environmental ecology: The impacts of pollution and other stresses on ecosystem structure and function. London: Academic Press. 1989;4 (2):168-169.
63. Google.Maps. 2025, Available at https://www.google.com/maps (Date of Access 06/09/2025).
64. Hakanson L. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control – a Sedimentological Approach. *Water Resources.* 1980;14:975-1001.
65. Smith VK, William HD. Measuring Water Quality Benefits. Boston: Kluwer-Nijhoff Publishing, 1986:328.

UDC 502.175

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF AQUATIC ECOSYSTEM COMPONENTS OF THE KHODTSA RIVER IN THE MOSCOW REGION UNDER ANTHROPOGENIC LOAD

© 2025. S.P. Zamana*, V.M. Zubkova, Zh. S. Makakhanyuk***

**State University of Land Management*
15, Kazakova Str., Moscow, 105064, Russia. E-mail: svetlana.zamana@gmail.com
***Russian State Social University*
4-1, Wilhelma Picka Str., Moscow, 129226, Russia

Received October 10, 2025. Revised November 10, 2025. Accepted December 01, 2025.

Presently, small rivers are under a extreme anthropogenic load, especially in regions with many industrial enterprises and high population density. Therefore, their abiotic and biotic components undergo negative changes, which makes a geo-ecological assessment of the aquatic ecosystem of one of them, such as the Khodtsa River in the Moscow Region (its source is at Elektrostal, and its mouth is at Pavlovsky Posad), quite relevant. We addressed the following objectives: determining pollutants in water, snow, coastal soil, bottom sediments, higher aquatic vegetation, and fish, as well as assessing bioindicators, the bioproductivity of higher aquatic vegetation, and environmental risk zones in different sections of the river.

We based our research on the data from field studies conducted in 2017-2023 at various sections of the Khodtsa River, and from laboratory studies. The general methodology included sampling water, snow, coastal soil, bottom sediments, and plants at 3 locations: source of the river, intermediate point, and mouth of the river. Standard methods from the Register of Quantitative Chemical Analysis were used for sample analysis. Currently, quantitative assessment of the risk of ecosystem deterioration is primarily based on the level of pollutant concentration exceeding the established standard in a specific component. However, when addressing environmental issues related to chemical pollution, it is important to consider the response of living organisms to pollution using bioindication and biotesting. Since abiotic components such as water, bottom sediments, and coastal soil in an aquatic ecosystem determine the most important processes that influence the functioning of biotic components (i.e., all living organisms), we used an ecosystem approach based on a comprehensive quantitative study of the migration of priority toxic elements in all links of the biogeochemical food chain of the Khodtsa River aquatic ecosystem.

Our studies of the river's aquatic ecosystem revealed patterns of heavy metal migration in the “water – bottom sediment – coastal soil – plants – fish” system. Iron, cadmium, lead, ammonium nitrogen, and petroleum products were the predominant pollutants at various sampling sites along the river. Compared to the coastal soil, the bottom sediments were significantly more contaminated with heavy metals at the source and intermediate points. Spatial variability of heavy metal content in sedge (*Carex aquatilis*) was revealed, depending on their content in water and bottom sediments. Moreover, an acropetal pattern of heavy metal distribution in plants was observed: roots accumulated 7-24 times more Cd, 2-4 times more Pb, and 112-251 times more Fe than shoots. Therefore, to determine the pollution of the aquatic ecosystem with heavy metals, we recommend using sedge (especially its roots) as a bioindicator, which can also be used for phytoremediation of small rivers. The biological productivity of higher aquatic vegetation increased from the source to the mouth of the Khodtsa River.

A complex pattern of heavy metal accumulation in the muscle tissue of the studied fish species such as Amur sleeper and common roach was revealed. During a comprehensive assessment of the pollution of abiotic and biotic components, zonation of the river was carried out. The Khodtsa River is characterized by predominant chemical pollutants (heavy metals, petroleum products, ammonia nitrogen). Zones of increased environmental risk were identified at the source and intermediate point, indicating a significant contribution to pollution from municipal and industrial discharges from Elektrostal. However, later in 2023 monitoring of the coastal soil using the lettuce as a test object

revealed that the heavy metal content at the intermediate point was higher than at the river's source, which is explained by a significantly reduced pollutant input from Elektrostal enterprises. Therefore, for the most rapid and cost-effective assessment of river pollution by heavy metals, phytotoxicity testing of coastal soil using the lettuce as a test object should be used for monitoring.
Keywords: ecosystem approach, water, bottom sediments, coastal soil, water sedge, fish, heavy metals, bioindicators, phytotoxicity, river zonation.
DOI: 10.24412/2542-2006-2025-4-63-104
EDN: CYWCLE