

ОЦЕНКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ИЖЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ГИДРОХИМИЧЕСКИМ И ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Н.В. Холмогорова^{1*}, Л.В. Головатюк², О.А. Пушина¹

¹Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия;

²Институт биологии внутренних вод им. Н.Д. Папанина, п. Борок, Россия

Эл. почта: nadjaholm@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.02.2026; принята к печати 16.04.2026

На протяжении многих лет качество воды Ижевского водохранилища (ИВХ) вызывает тревогу. Летом и осенью в акватории ИВХ регулярно отмечаются «вспышки» численности цианобактерий, что значительно ухудшает качество воды. Купание на городском пляже запрещено более 20 лет. Несмотря на долгую историю исследований, до настоящего времени не получены единовременные комплексные оценки состояния воды и донных отложений ИВХ по гидрохимическим показателям и данным биоиндикации. Восполнение этого пробела было целью настоящей работы. Установлено, что, хотя по большинству показателей качество воды ИВХ в осенний период оценивается классом II (чистая), на всем протяжении ИВХ отмечается превышение предельно допустимых концентраций легко окисляемых органических соединений и, локально, нефтепродуктов. В донных отложениях аккумулировано значительное количество токсикантов, включая тяжелые металлы (хром, медь, свинец, никель, цинк и кобальт), уровни которых в несколько раз превышают фоновые значения, и нефтепродукты. Загрязнение ИВХ тяжелыми металлами существенно выше, чем в ряде водохранилищ Волжского каскада. Почти за 20 лет не отмечено улучшения состояния ИВХ по содержанию тяжелых металлов в донных отложениях и показателям макрозообентоса, но количественные характеристики кормовых объектов, потребляемых бентосоядными рыбами, остаются относительно стабильными. В ИВХ происходит активное расселение моллюска *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771), захватывающего свободные экологические ниши, что вызывает необходимость проведения дальнейших мониторинговых исследований водоема для оценки последствий влияния инвазивного вида на аборигенные сообщества и состояние кормовой базы рыб.

Ключевые слова: Ижевское водохранилище, тяжелые металлы, донные отложения, макрозообентос, биоиндикация

ASSESSMENT OF THE CURRENT CONDITION OF IZHEVSK RESERVOIR USING HYDROCHEMICAL AND HYDRO-BIOLOGICAL INDICATORS

N.V. Kholmogorova^{1*}, L.V. Golovatiuk², O.A. Pushina¹

¹Udmurt State University, Izhevsk, Russia;

²N.D. Papanin Institute of Inland Water Biology, Borok, Russia

Email: nadjaholm@mail.ru

The quality of water of the Izhevsk Reservoir is alarming. In summer and autumn, outbreaks of cyanobacteria occur regularly in the water basin and significantly spoil water quality. Swimming at the city beach is prohibited for more than 20 years. Despite the long history of research of the reservoir, no single comprehensive assessments of the conditions of its water and bottom sediments according to hydrochemical and bioindicator data have been obtained so far. Filling this gap was the purpose of the present work. It has been found that, although according to most indicators the quality of water of the Izhevsk Reservoir in autumn is judged as class II (pure), the maximum permissible concentrations of easily oxidized organic matter and, locally, petroleum products are exceeded throughout the water basin. Sediments accumulate significant amounts of toxins, including heavy metals (chromium, copper, lead, nickel, zinc and cobalt), several times above the background values, and petroleum products. Izhevsk reservoir pollution with heavy metals is substantially higher than in the cases of several reservoirs of the Volga Cascade. Heavy metal content in the bottom sediment of Izhevsk Reservoir and its macrozoobenthos did not improve for almost 20 years, but the quantitative characteristics of the alimentary objects consumed by benthic fish remain relatively stable. In the reservoir, the mollusk *Dreissena polymorpha* (Pallas, 1771) actively spreads and occupies spare ecological niches. This necessitates further monitoring of the reservoir to assess the impact of the invasive species on aboriginal communities and the condition of fish forage reserve.

Keywords: Izhevsk Reservoir, heavy metals, sediments, macrozoobenthos, bioindication

Введение

Водные объекты в условиях урбанизации подвержены разностороннему антропогенному воздействию [11, 18, 39]. В результате деятельности промышленных предприятий и эксплуатации автотранспорта, а также смывов ливневых стоков с городских территорий в водоемы поступают различные загрязняющие вещества, такие как щелочные и щелочноземельные металлы, биогенные элементы, тяжелые металлы и др. [2, 25]. Как следствие, в водоемах происходит изменение химического состава вод, что сказывается на их качестве и пригодности для различных видов водопользования [18].

Ижевское водохранилище (ИВХ) – антропогенный водоем плотинного типа, созданный в среднем течении р. Иж для нужд железодельательного завода в 1759 году – расположено в центральной части г. Ижевска, используется для рекреации, водоснабжения населения и промышленных предприятий. Воду из ИВХ потребляет 1/3 жителей города¹.

Загрязняющие вещества поступают в ИВХ с водосборного бассейна с притоками, а также с тальми и дождевыми водами с городской территории, вызывая, в числе прочих последствий, массовое цветение цианобактерий в летне-осенний периоды. Согласно расчетам, проведенным институтом Ленгипроводхоз в 1994 году [7], в водоемы и водотоки бассейна Ижевского пруда со сточными водами ежегодно поступает 38,1 т общего фосфора, 245,6 т общего азота, 10,0 т хлорид-ионов и 500,9 т нефтепродуктов. Основной вклад в загрязнение природных вод этими химическими веществами вносят стоки животноводства и смывы с сельскохозяйственных угодий и нарушенных территорий. Роль промышленности и жилищно-коммунального хозяйства в поступлении вышеуказанных объемов загрязняющих веществ в ИВХ не столь велика, но она постоянно растет в связи с развитием нефтедобычи в водосборе реки Иж, а также по мере расширения площадей селитебных территорий, занимаемых частной застройкой в окрестностях г. Ижевска. При этом организованный сброс промышленных сточных вод непосредственно в Ижевский пруд осуществляют только ТЭЦ-1 г. Ижевска и АО «Ижевский мотозавод «Аксион-холдинг». Стоки этих городских предприятий характеризуются как «условно чистые» [12].

Оценка качества воды ВДХР, как источника питьевого и промышленного водоснабжения, ведется с 1950-х годов, сведения о содержании загрязняющих веществ содержатся в работах [4-5, 12, 16]. Донные отложения изучались при проведении геоэкологических работ в 1991–1993¹ и 1998–1999 годах², а также в рамках комплексного экологического обследования верхней и средней части ВДХР в 2011–2012 годах [12].

Первые исследования макрозообентоса Ижевского пруда проведены В.В. Варфоломеевым в 1956–64 годах [3], однако списки видов в его работах отсутствовали. Дальнейшие исследования этой группы гидробионтов связаны с научной деятельностью лаборатории Госкомприроды Удмуртской республики (УР), в ходе которых в 1991 году было выявлено 32 вида [8]. В 2006 году по заказу МУП «Ижводоканал» сотрудниками Пермского отделения ФГНУ «ГосНИОРХ» был определен состав фауны макрозообентоса ИВХ, включающий 70 видов, проведена оценка качества воды и экологического состояния водоема по биотическим показателям [9]. Описание зарослевой фауны верхней части пруда и Пазелинского залива приведены в работах [10, 32]. В 2011–2012 годах ученые Удмуртского государственного университета изучали макрозообентос верхней и средней частей ИВХ, и были отмечены 29 видов и таксонов более высокого ранга [12].

Несмотря на достаточно долгую историю исследований Ижевского ВДХР, до настоящего времени не проводилось единовременной комплексной оценки состояния воды и донных отложений пруда по гидрохимическим и гидробиологическим показателям.

Цель данной работы – оценить современное экологическое состояние Ижевского ВДХР по комплексу химических показателей и данным биоиндикации.

Материалы и методы исследования

Гидрологическая характеристика ИВХ.

ИВХ вытянуто с северо-запада на юго-восток вдоль русла р. Иж и имеет протяженность до 13 км (рис. 1). Его объем при нормальном подпорном уровне (99,5 м) составляет 76,3 млн м³, площадь зеркала – 26,4 км², максимальная ширина – 2,3 км, наибольшая глубина – 12 м, средняя глубина – 3,2 м, площадь мелководий с глубинами до 2 м – 7 км² [21], коэффициент водообмена – около 3,34 [23]

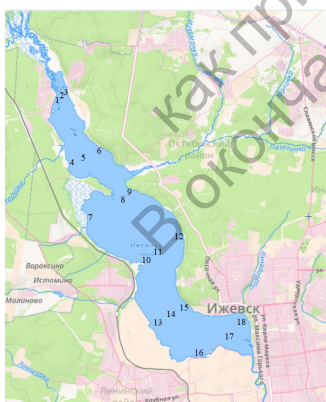


Рис. 1. Карта-схема станций отбора проб на Ижевском водохранилище

¹ Качанов НВ, Сажнев ИВ, Качанова ЛЕ, Стурман ВИ, Ильминских НГ, Печерских ВН.

Геоэкологическое исследование масштаба 1:25 городской агломерации г. Ижевска. Отчет. Москва: Государственное научно производственное предприятие «Аэрогеология»; 1993;(1).

² Борзенков АВ. Отчет об эколого-геологическом обследовании Ижевского пруда. Неклюдово, 1999. Геолфонд УР, инв. № 749д.

Притоками ИВХ являются реки Люк, Пазелинка, Шабердинка, Подборенка и Малиновка. Питание водоема смешанное, осуществляется преимущественно за счет осадков зимнего периода (60–65% годового стока), а также поступления дождевых и грунтовых вод. В двух местах берега ИВХ сближаются на расстояние 500–1500 м, в результате чего акваторию можно разделить на три участка: верхний (ст. 1–6), средний (ст. 7–12) и нижний (ст. 13–18).

Полевые исследования и методы анализа данных

Материал отбирали в сентябре 2025 года на 6 разрезах ИВХ, каждый из которых включал три станции (рис. 1). Выбор периода исследований был обусловлен необходимостью проведения сравнительного анализа состояния ИВХ в многолетнем аспекте.

В местах отбора проб с помощью полевых приборов измеряли следующие гидрологические и физико-химические показатели: глубину (эхолот Lowrance 9 TI), температуру поверхностного слоя воды, прозрачность (диск Секки), содержание растворенного кислорода (оксиметр Марк-302Э) и общую минерализацию (ТДС-метр E-Z9909SP).

Пробы воды отбирали с поверхностного горизонта 0–0,15 м. В связи с тем, что водные ресурсы ИВХ одновременно используются в различных целях (рекреационных, рыбохозяйственных, хозяйственно-бытовых), для определения качества воды согласно Приказу Росрыболовства от 26.05.2025 N 296³ взяты наиболее жесткие нормативы ПДК, характерные для водных объектов рыбохозяйственного назначения. Оценку качества воды проводили с использованием индекса ИЗВ:⁴

$$\text{ИЗВ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i}$$

где: n – число показателей, используемых для расчёта индекса; C_i – концентрация химического вещества в воде (мг/л); ПДК_i – предельно допустимая концентрация вещества в воде (мг/л).

Отбор и подготовка проб донных отложений (ДО) были выполнены в соответствии с базовыми национальными стандартами⁵.

Анализ гидрохимических показателей воды и ДО проводился в аккредитованной лаборатории Регионального центра государственного экологического контроля и мониторинга по УР АУ «Управление Минприроды УР». В отобранных образцах ДО определяли содержание валовых форм микроэлементов рентгенофлуоресцентным методом на спектрометре «Квант Z» при помощи аттестованной методики М-049-П/10, нефтепродуктов (НПР) – методом ИК-спектрофотометрии концентратометром «КНЗ». Из общесанитарных показателей состояния Ижевского водохранилища определялись: прозрачность воды, водородный показатель (рН), содержание растворенного кислорода и биохимическое потребление кислорода (БПК₅).

По причине того, что в России отсутствуют утвержденные экологические нормативы содержания веществ в ДО, при анализе полученных результатов использовали разработанные на основе исследований Куйбышевского водохранилища и рекомендуемые к практическому применению предельно допустимые уровни загрязнения ДО (ПДУ_{до}) [20]. При оценке загрязнения ДО нефтепродуктами основывались на рекомендованных региональных нормативах [24].

Отбор проб макрозообентоса производили с лодки дночерпателем ДАК-100 (1/100 м²) трехкратным зачерпыванием донного грунта в каждой точке. Беспозвоночных фиксировали в 70% этиловом спирте, камеральную обработку проб проводили, руководствуясь методическими указаниями [13]. Для идентификации видов макрозообентоса использовали ключи [1, 26–28]. Для оценки видовой структуры сообществ рассчитывали индекс доминирования (D_i) [17, 33].

Оценку качества воды по показателям макрозообентоса проводили на основе биотического индекса Вудивисса [40], индекса сапробности по Пангле-Букку [36], индекса видового разнообразия Шеннона [37]. Для оценки связи между биотическими показателями и абиотическими факторами был рассчитан коэффициент ранговой корреляции Спирмена (r_s) в программе Statistica 10.

Результаты исследований и их обсуждение

Химический состав воды Ижевского водохранилища

Прозрачность воды неравномерна: от верхнего участка (ст. 1–6) к среднему и нижнему (ст. 7–18) осенью 2025 года наблюдалось снижение ее величины от 1,1–1,7 м до 0,61–0,99 м. Взмучиванию грунтов

³ Приказ Федерального агентства по рыболовству от 26 мая 2025 года № 296 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения».

⁴ Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод. Утв. Госкомгидрометом СССР 22.09.1986 г. №250–1163 М.: Госкомгидромет СССР;1986.

⁵ ГОСТ 17.4.4.02-84, ГОСТ 28168-89, ГОСТ 17.4.3.01-83, ГОСТ Р 53123-2008 (ИСО 10381-5:2005)

и поступлению взвешенных веществ в воду на данном участке могут способствовать работа земснаряда и более активное использование плавсредств (моторные лодки, гидроциклы) в рекреационных целях, а в приплотинной части – стоки с территории города и река Подборенка.

Водородный показатель (ед. pH). Вода ИВХ почти на всем его протяжении имеет слабощелочную реакцию (pH 7,75–8,46) (рис. 2). Исключение составляет станция 9, где вода характеризуется как нейтральная (pH 7,45). Изменчивость pH по длине ИВХ невелика, и, как показал анализ данных, его значения находятся в пределах ПДК для рыбохозяйственных водоемов (6,5–8,5), однако в другие сезоны (август 2024 года), как сообщалось [5], может наблюдаться превышение норматива pH.

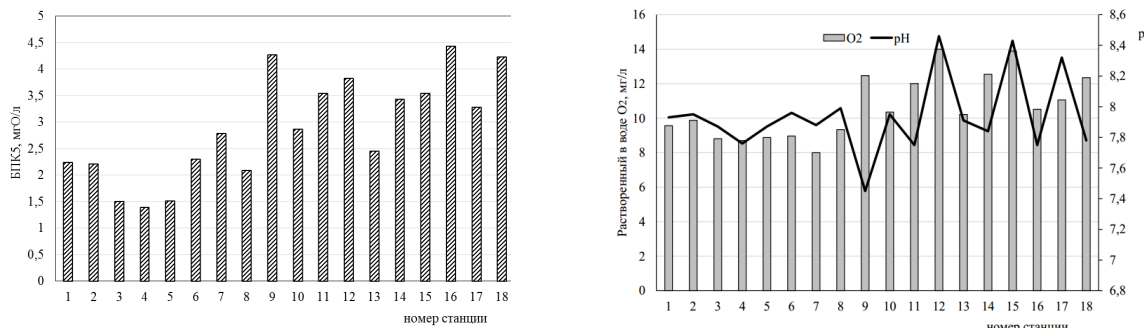


Рис. 2. Санитарные показатели воды Ижевского водохранилища в сентябре 2025 г.

Кислородный режим водохранилища благоприятен для развития гидробионтов, концентрации кислорода в сентябре 2025 года не падали ниже нормативных показателей, находясь в диапазоне 8,0–14,0 мг/л. В верхнем участке водохранилища содержание кислорода колебалось в пределах 8,0–9,9 мг/л. Начиная от среднего участка (ниже устья р. Пазелинка, ст. 9) до приплотинного насыщение воды растворенным кислородом возрастало от 10,2 мг/л до 14,0 мг/л. Таким образом, наблюдается тренд увеличения концентрации кислорода в воде от верхней части водохранилища к нижней. В ходе многолетних наблюдений (1950–2003 годы) было показано, что минимальное содержание кислорода в ИВХ присуще концу зимней межени, а максимальное – периоду перед ледоставом (ноябрь) [4, 16].

Содержание лабильной фракции органического вещества (БПК₅) превышает установленные для вод рыбохозяйственного назначения нормативы в 1,1–2,0 раза почти на всем протяжении водохранилища, за исключением станций 3, 4 и 5 в верхней части водоема. Это указывает на загрязнение большей части водохранилища органическим веществом и подтверждает данные более ранних исследований [4, 12, 16].

Общая минерализация воды не превышала значений ПДК_{рх}, находясь в диапазоне 153–257 мг/л. Наибольшие показатели минерализации (257 мг/л) характерны для приплотинного участка со стороны правого берега (ст. 16). Колебания общей минерализации воды могут быть связаны с химическим составом осадочных пород бассейна Ижевского водохранилища и влиянием промплощадок заводов «Ижсталь» и «Ижмаш».

Из биогенных элементов определялись фосфаты и формы азота (нитритный, нитратный). Содержание как нитратного, так и нитритного азота на всех участках водохранилища в несколько раз ниже ПДК: от <0,1 до 0,2 мг/л, и <0,003 до 0,007 мг/л соответственно (рис. 3).

Содержание фосфат-ионов (PO₄³⁻) и общего фосфора не превышало ПДК_{рх} на всем протяжении водохранилища, изменяясь от <0,05 до 0,067 мг/л и от <0,04 до 0,084 мг/л соответственно.

На основе данных сентябрьской съемки, по содержанию в воде фосфат-ионов, ИВХ следует отнести к олиготрофному типу водоемов.

Среди специфических органических соединений исследовались нефтепродукты, содержание которых на большинстве обследованных станций было ниже ПДК_{рх} (0,007–0,019 мг/л), однако на среднем участке водохранилища (ст. 8) зафиксировано загрязнение воды до уровня 3 ПДК. Как показали проведенные ранее исследования, незначительный рост содержания нефтепродуктов свойственен теплему периоду – с мая по октябрь [4].

Для оценки качества воды ИВХ на основе шести измеренных показателей был произведен расчет индекса ИЗВ (индекс загрязнения воды), результаты которого представлены в табл. 1. На обследованных станциях индекс изменялся от 0,31 (верхний участок, ст. 4, 5) до 0,78 (нижний участок, ст. 8), то есть находился в диапазоне, соответствующем классу II качества – «вода чистая». Наиболее высокие значения индекса обусловлены загрязнением воды легко окисляемыми органическими соединениями (по БПК₅) и нефтепродуктами. Проведенная за период с 2006 года по 2016 год оценка качества воды ИВХ в районе водозабора очистных сооружений Ижводоканала по удельному комбинаторному индексу загрязнения воды (УКИЗВ) также характеризовала воду как «условно чистая» и «слабозагрязненная» (классы I и II) [4].

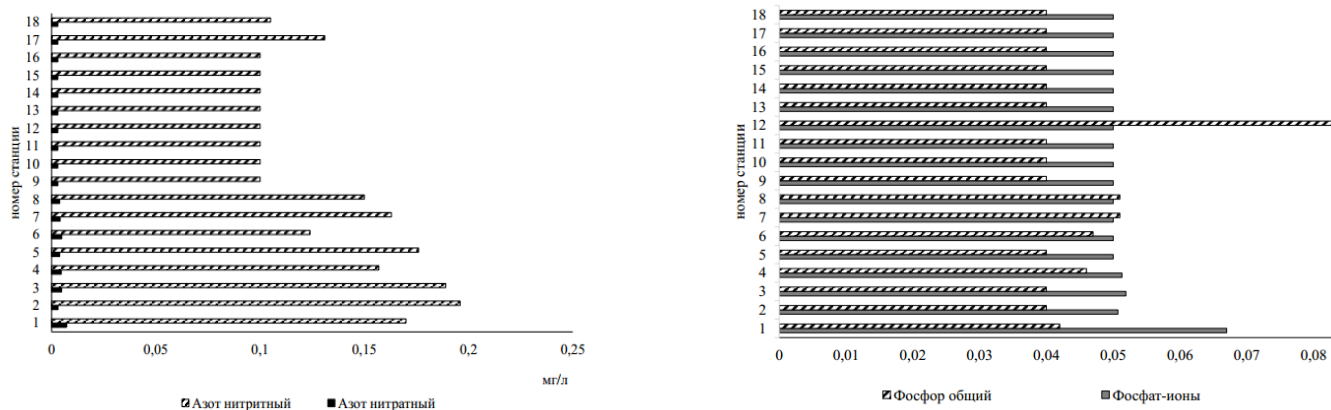


Рис. 3. Содержание биогенных элементов в Ижевском водохранилище в сентябре 2025 г.

Табл. 1.

Индексы ИЗВ и содержание нефтепродуктов в ДО Ижевского водохранилища осенью 2025 года

№ станции	Вода								Донные отложения	
	O ₂	БПК ₅	NNO ³⁻	NNO ²⁻	P _{общ}	НПР	ИЗВ	КК	НПР, мг/кг	Уровень НПР
1	0,63	1,07	0,0002	0,089	0,21	0,242	0,37	П	326	У
2	0,61	1,05	0,00007	0,039	0,2	0,296	0,37	П	222	У
3	0,68	0,72	0,0001	0,06	0,2	0,384	0,34	П	215	У
4	0,69	0,66	0,0001	0,058	0,23	0,234	0,31	П	341	У
5	0,68	0,72	0,00009	0,049	0,2	0,212	0,31	П	351	У
6	0,67	1,09	0,0001	0,061	0,24	0,164	0,37	П	248	У
7	0,75	1,33	0,0001	0,051	0,26	0,316	0,45	Н	640	Э
8	0,64	0,99	0,00009	0,049	0,26	2,76	0,78	П	241	У
9	0,48	2,03	0,00008	0,038	0,2	0,154	0,48	П	550	Э
10	0,57	1,37	0,00008	0,038	0,2	0,192	0,39	П	184	У
11	0,50	1,69	0,00008	0,038	0,2	0,162	0,43	П	550	Э
12	0,43	1,82	0,00008	0,038	0,42	0,19	0,48	П	450	Э
13	0,59	1,17	0,00008	0,038	0,2	0,172	0,36	П	376	У
14	0,48	1,63	0,00008	0,038	0,2	0,176	0,42	П	550	Э
15	0,43	1,69	0,00008	0,038	0,2	0,192	0,43	П	460	Э
16	0,57	2,11	0,00008	0,038	0,2	0,208	0,52	П	199	У
17	0,54	1,56	0,00008	0,038	0,2	0,214	0,43	П	1560	Э
18	0,49	2,01	0,00008	0,038	0,2	0,146	0,48	П	243	У
ПДК_{рх}	6,0	2,1	40	0,02	0,2	0,05			<50 – загрязнение слабое; 50-400 – умеренное (У); >400 – экстремальное (Э)	

Примечания: НПР – нефтепродукты; КК – класс качества воды

Донные отложения.

Поверхностные слои ДО в ИВХ на станциях 2, 3 и 16 представлены песком и детритом, а в остальных местах отбора проб – темноокрашенными илами с остатками детрита. По данным геолого-экологического обследования, проведенного ГПП «Волгагеология» в 1998–1999 годах², мощность донных отложений в акватории пруда изменяется от 0 до 1,2 м, увеличиваясь от берегов к центральной части.

В донных отложениях определяли валовое содержание микроэлементов – мышьяка, кадмия, хрома, меди, свинца, никеля, цинка, кобальта – и массовую долю нефтепродуктов. Содержание кадмия было существенно ниже ПДУ_{до}, а небольшое превышение концентрации мышьяка (1,1 ПДУ_{до}) отмечено локально лишь в среднем участке ИВХ на ст. 7 (табл. 2). Основными токсикантами неорганического происхождения, встречающимися почти на всех участках в концентрациях, превышающих ПДУ_{до}, являются хром, медь, свинец, никель, цинк и кобальт. Максимальные концентрации большинства перечисленных элементов постепенно возрастали от верхнего к нижнему участку: содержание меди от 58 до 94 мг/кг (до 3,0 ПДУ_{до}), свинца – от 21 до 42 мг/кг (до 2,4 ПДУ_{до}), никеля – от 92 до 120 мг/кг (до 2,3 ПДУ_{до}), цинка – от 125 до 241 мг/кг (до 2,3 ПДУ_{до}). Концентрация хрома и кобальта в ДО была минимальной на среднем участке (182 и 9,4 мг/кг соответственно), достигая максимума в приплотинном (246 и 14 мг/кг соответственно). У хрома было самое высокое среди всех токсикантов превышение ПДУ_{до}

– до 8,5-кратного. Сравнение указанных выше концентраций меди, никеля и цинка с данными, полученными в 2011–12 годах. [12], не выявило улучшения качества ДО Ижевского ВДХР в 2025 году.

Аккумуляция значительного количества загрязняющих веществ в ДО объясняется главным образом интенсивной геохимической техногенной аномалией на дне Ижевского пруда, расположенной в районе шлакоотвала ОАО «Ижсталь» г. Ижевска и характеризующейся содержанием ряда химических элементов (меди, никеля, хрома, марганца, олова и др.) в ДО, превышающих фоновые концентрации в десятки раз [12]. Кроме того, следует отметить, что высокие концентрации меди могут определяться региональными особенностями геохимической провинции Волго-Камского региона или быть характерными для илисто-глинистых типов донных отложений притоков р. Кама [19].

Табл. 2.

Концентрации тяжелых металлов (валовые формы, мг/кг) в донных отложениях разных участков ИВХ в сравнении с ПДУ_{до}. В числителе – min-мах содержания элемента, в знаменателе – min-max превышения ПДУ_{до} соответственно типу грунта на участке

Участок	Мышьяк	Кадмий	Хром	Медь	Свинец	Никель	Цинк	Кобальт
Верхний	5,1–14,1	0,05–0,15	156–308	17–58	0,48–21	52–92	38–125	9,3–16,5
	–	–	4,2–8,3	1,3–1,8	1,01–1,2	1,1–1,7	1,03–1,2	1,2–2,7
Средний	4,5–20	0,05–0,16	88–267	2,1–67	6,7–29	30–104	56–160	3,3–12,3
	1,1	–	2,4–7,2	1,7–2,1	1,1–1,6	1,5–2,0	1,1–1,5	–
Нижний	5,5–11,6	0,05–0,18	130–313	18–94	7,2–42	28–120	20–241	6,6–21,8
	–	–	3,5–8,5	1,1–3,0	1,01–2,4	1,4–2,3	1,2–2,3	1,1–1,7
ПДУ _{до} , ил	18,3*	2,2	37	32	18	53	105	13
ПДУ _{до} , песок	18,3*	0,6	7	5	4,3	21	73	5

* расчетные уровни [20]

Сравнение концентраций металлов в ДО водохранилищ Волжского каскада (Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское, Куйбышевское, Саратовское, Волгоградское) [25] с данными, полученными для ИВХ, показало значительно более высокий уровень загрязнения последнего. Так, максимальные концентрации хрома в ДО ИВХ были выше наибольшего зарегистрированного показателя в Волжских водохранилищах в 2,7 раз, никеля – в 1,9 раз, меди – в 3,8 раз, цинка – в 2,7 раз, что можно объяснить 260-летним воздействием металлургического производства.

На всем протяжении водоема наблюдалось загрязнение грунтов нефтепродуктами, соответствующее умеренному и экстремальному уровням (табл. 1). Наибольшее их содержание выявлено в среднем и нижнем участках водохранилища (ст. 7, 9, 11, 12, 14, 15, 17), что объясняется нефтедобычей в верхнем течении р. Иж, стоками с водосборного бассейна, эксплуатацией моторных лодок и катеров.

Макрозообентос.

В составе фауны макрозообентоса отмечено 36 видов и таксонов более высокого ранга, среди которых наиболее разнообразны хирономиды (13 видов) и олигохеты (11 видов) (табл. 3). Наибольшее число видов (16) зарегистрировано на ст. 1 верхнего участка ВДХР, где сохраняются проточные речные условия, и на ст. 16 нижнего участка (12 видов), характеризующихся небольшими глубинами (1,5 м). В остальных местах отбора проб таксономическое богатство находилось в пределах 2–7 видов с наименьшим разнообразием в русловой глубоководной зоне (ст. 14).

По данным 2025 года, для Ижевского водохранилища впервые указываются моллюски *Unio tumidus*, поденки *Cloeon bifidum*, хирономиды *Polypedilum exsectum*, ручейники *Ecnomus tenellus*.

Кроме перечисленных видов макрозообентоса в пробах отмечены мейобентосные олигохеты, ряд которых также указываются впервые: *Chaetogaster diastrophus* Gruithuisen, 1828; *Dero obtusa* d'Udekem, 1855; *Nais variabilis* Piguët, 1906; *Ophidonais serpentina* Müller, 1773; *Slavina appendiculata* d'Udekem, 1855.

В экологическом отношении сообщества гидробионтов представлены пелофильными и фитофильными видами, что характерно для большинства водохранилищ с низкой проточностью [14–15]. С частотой более 30% встречались олигохеты *Limnodrilus hoffmeisteri* (частота встречаемости 78%), хирономиды *Chironomus plumosus* (67%), *Fleurelia lacustris* (39%), *Glyptotendipes glaucus* (39%) и *Endochironomus albipennis* (39%). Отмечено широкое распространение моллюсков-вселенцев *Dreissena polymorpha* (33%), единичные находки которых сделаны впервые в 2013 году локально – в нижнем бьефе ИВХ [23], что свидетельствует об активном расселении в водоеме одного из 100 наиболее опасных инвазионных видов России [6]. Олигохеты *L. hoffmeisteri*, хирономиды *Ch. plumosus* и моллюски *D. polymorpha* относятся к числу широко распространенных видов и в других равнинных водохранилищах [14, 22].

Наибольшим разнообразием (21 таксон) и представленностью таксономических групп (8 групп) отличался верхний участок водоема, наименьшим – средний (17 таксонов из 4 групп) (табл. 4). Представители отряда Ephemeroptera были найдены только в верхнем участке, отрядов Odonata и

Trichoptera – в нижней части ВДХР, при этом по числу видов на всех участках преобладали хирономиды и олигохеты.

Численность макрозообентоса на разных станциях варьировала от 125 экз./м² (ст. 2) до 3892 экз./м² (ст. 18), биомасса с учетом крупных моллюсков – от 0,48 г/м² до 1469 г/м² соответственно, составляя в среднем по водоему 1264 экз./м² и 99,7 г/м² (табл. 4). Основной вклад в показатели общей численности донных сообществ вносили личинки хирономид (48%) и олигохеты (35%), а биомасса определялась моллюсками *D. polymorpha* и *U. tumidus* (74% от общей биомассы). В то же время биомасса мягкого (кормового) бентоса в среднем по водохранилищу составила 6,57 г/м² за счет развития личинок хирономид (73%) и олигохет (18%).

Табл. 3.

Состав фауны макрозообентоса на русловых станциях ИВХ (сентябрь 2025 года)

Таксономическая группа	Таксон
Mollusca	<i>Valvata piscinalis</i> O.F. Müller 1774; <i>Dreissena polymorpha</i> (Pallas, 1771), <i>Unio tumidus</i> (Philipsson in Retzius, 1788)*, <i>Lymnaea balthica</i> (L., 1758)
Oligochaeta	<i>Limnodrilus hoffmeisteri</i> Claparede, 1862; <i>L. udekemianus</i> Claparede, 1862; <i>Lumbriculus variegatus</i> O.F. Müller, 1773; <i>Potamothrix hammoniensis</i> (Michaelsen, 1901); <i>Spirosperma ferox</i> Eisen, 1879; <i>Tubifex tubifex</i> O.F. Müller, 1773
Hirudinea	<i>Piscicola geometra</i> Linnaeus, 1761
Hydrachnidia	Hydrachnidia gen.
Ephemeroptera	<i>Cloeon</i> гр. <i>dipterum</i> L., 1758; <i>C. bifidum</i> Bengtsson, 1912*
Trichoptera	<i>Ecnomus tenellus</i> Rambur, 1842*
Odonata	<i>Erythromma najas</i> Hansermann, 1823; <i>Epitheca bimaculata</i> Charpentier, 1825
Diptera	<i>Chaoborus</i> sp. Lichtenstein, 1800; <i>Procladius choreus</i> Meigen, 1804; <i>P. ferrugineus</i> Kieffer, 1919; <i>Chironomus</i> sp. Meigen, 1803; <i>Ch. plumosus</i> (Linnaeus, 1758); <i>Corynoneura scutellata</i> Winnertz, 1846; <i>Cricotopus</i> гр. <i>sylvestris</i> ; <i>Cryptochironomus</i> гр. <i>defectus</i> ; <i>Dicrotendipes nervosus</i> Staeger, 1839; <i>Endochironomus albipennis</i> Meigen, 1830; <i>Glyptotendipes glaucus</i> Meigen, 1818; <i>Fleuria lacustris</i> Kieffer, 1924; <i>Polypedilum nubeculosum</i> Meigen, 1804; <i>Polypedilum exsectum</i> Kieffer in Thienemann, 1916*; <i>Sphaeromias pictus</i> Meigen, 1818

Примечания: «*» - впервые указываются для Ижевского водохранилища

Табл. 4.

Показатели числа видов (n), средней численности (N, экз./м²) и средней биомассы (B, г/м²) таксономических групп макрозообентоса на разных участках ИВХ в сентябре 2025 года.

Таксономическая группа	Верхний участок			Средний участок			Нижний участок			В среднем по ВДХР		
	n	N	B	n	N	B	n	N	B	n	N	B
Ephemeroptera	2	89	0,13	-	-	-	-	-	-	2	30	0,04
Trichoptera	-	-	-	-	-	-	1	25	0,02	1	8	0,005
Hirudinea	1	6	0,01	-	-	-	-	-	-	1	2	0,004
Odonata	-	-	-	-	-	-	2	8	0,72	2	3	0,24
Oligochaeta	6	320	1,6	4	515	1,39	7	515	0,6	10	447	1,2
Gastropoda	2	11	0,54	-	-	-	-	-	-	2	4	0,18
Bivalvia	1	6	2,66	1	28	12,9	2	358	264	2	132	93,1
Chironomidae	6	486	2,9	10	571	4,62	6	771	6,8	13	610	4,77
Diptera (прочие)	2	26	0,08	2	56	0,28	-	-	-	2	27	0,12
Hydrachnidia	1	6	0,006	-	-	-	-	-	-	1	2	0,002
Всего	21	945	7,93	17	1170	19,2	18	1677	272	36	1264	99,7
Мягкий (кормовой) бентос		939	5,27		1142	6,3		1319	8,14		1135	6,57

Так же, как в целом по водохранилищу, на отдельных его участках основную долю численности составляли личинки хирономид и малощетинковые черви, а долю биомассы – кроме указанных групп, двусторчатые моллюски. Следует отметить возрастание (на два порядка) биомассы двусторчатых моллюсков от верховьев к приплотинной части ВДХР преимущественно за счет развития *D. polymorpha*. Биомасса кормового зообентоса также увеличивалась от верхнего участка (5,27 г/м²) к нижнему (6,57 г/м²).

Сравнение полученных данных с результатами исследований, проведенных осенью 2004 года [1], показал резкое, в 4 раза (от 23,2 до 100,8 г/м²), возрастание средней по ИВХ биомассы донных беспозвоночных в 2025 году, обусловленное активной экспансией моллюсков *D. polymorpha*. Биомасса кормового бентоса была близка к величинам, рассчитанным в среднем по водохранилищу осенью 2004

года (6,87 г/м²) и установленным для русловой части водохранилища осенью 2012 году (7 г/м²) [12], но была почти в два раза ниже средней биомассы кормовых организмов осенью 1960 году (11,25 г/м²) [3].

Доминирующий комплекс видов мягкого бентоса Ижевского ВДХР по численности включал хирономид *Ch. plumosus* ($D_i = 15,8$) и олигохет *L. hoffmeisteri* ($D_i = 10,1$), по биомассе – хирономид *Ch. plumosus* ($D_i = 36$).

При оценке качества воды по показателям зообентоса на всем протяжении водохранилища значения индекса Вудивисса изменялись от 2 до 7 баллов (табл. 5).

Табл. 5.

Оценка качества воды Ижевского водохранилища по показателям макрозообентоса в сентябре 2025 года

№ ст.	Индекс Вудивисса		Индекс Шеннона		Индекс сапробности	
	Значение индекса, балл	Класс качества воды	Значение индекса, бит./экз.	Класс Качества воды	Значение индекса	Зона сапробности, качество воды
1	7	чистая (II)	1,87	умеренно загрязненная (III)	2,35	β-мезосапробная, умеренно загрязненная
2	2	грязная (V)	1,33	загрязненная (IV)	2,93	α-мезосапробная, грязная
3	2	грязная (V)	1,29	загрязненная (IV)	2,81	α-мезосапробная, грязная
4	2	грязная (V)	0,45	очень грязная (VI)	3,6	полисапробная, сильно загрязненная
5	2	грязная (V)	0,87	грязная (V)	3,0	α-мезосапробная, грязная
6	2	грязная (V)	1,04	загрязненная (IV)	3,11	α-мезосапробная
7	2	грязная (V)	1,99	умеренно загрязненная (III)	2,95	α-мезосапробная, грязная
8	2	грязная (V)	1,22	загрязненная (IV)	2,65	α-мезосапробная, грязная
9	2	грязная (V)	1,08	загрязненная (IV)	2,77	α-мезосапробная, грязная
10	2	грязная (V)	1,36	загрязненная (IV)	2,62	α-мезосапробная, грязная
11	2	грязная (V)	1,38	загрязненная (IV)	2,95	α-мезосапробная, грязная
12	2	грязная (V)	1,09	загрязненная (IV)	3,09	α-мезосапробная, грязная
13	2	грязная (V)	1,12	загрязненная (IV)	2,9	α-мезосапробная, грязная
14	2	грязная (V)	0,65	грязная (V)	3,31	α-мезосапробная, грязная
15	2	грязная (V)	1,27	загрязненная (IV)	3,25	α-мезосапробная, грязная
16	5	умеренно загрязненная (III)	2,03	чистая (II)	2,35	β-мезосапробная, умеренно загрязненная
17	2	грязная (V)	0,84	грязная (V)	3,34	α-мезосапробная
18	2	грязная (V)	1,14	загрязненная (IV)	2,26	β-мезосапробная, умеренно загрязненная

Второй класс качества – вода «чистая» – был отмечен только на станции 1 верхнего участка, III класс – вода «умеренно загрязненная» - на мелководной станции 16 нижнего участка, тогда как остальные станции характеризовались V классом – вода «грязная». Показатели, полученные при расчете индекса видового разнообразия Шеннона (0,45-2,03 бит./экз.), который также используют при оценке качества воды [29], позволяют отнести большинство станций к «загрязненным» (IV класс) или «грязным» (V класс). Исключение составили станции 1, 7, где качество воды характеризовалось как «умеренно загрязненная» (III класс) и ст. 16 – как «чистая» (II класс). Индексы сапробности изменялись от 2,35 (β-мезосапробная зона, станции 1, 16) до 3,6 (полисапробная зона, станции 4, 18), остальные места отбора проб соответствовали α-мезосапробной зоне. Таким образом, рассчитанные индексы на большинстве обследованных станций изменялись в основном согласованно, оценивая качество воды как «загрязненная» и «грязная», за исключением станций 1 и 16, где согласно разным индексам качество воды изменялось от «чистой» до «умеренно загрязненной». Наиболее загрязненной по биотическим показателям была ст. 4,

вода характеризовалась как «грязная» и «очень грязная», а зона сапробности – как «полисапробная», что обусловлено развитием олигохет тубифицидного комплекса и личинок мокрецов *Sphaeromias pictus*. Наши результаты согласуются с данными оценки качества воды в 2004 г. [9], показавшими, что вся глубоководная зона, где происходит интенсивное накопление органического вещества, характеризуется как сильно загрязненная.

Принимая во внимание, что качество воды по гидрохимическим показателям в 2025 г. на всех станциях оценивалось II классом - «чистая», логично предположить, что на развитие макрозообентоса оказывает влияние загрязнение грунтов.

Для оценки связи между гидрохимическими показателями воды (O_2 , БПК₅, формы азота, фосфат-ионы, общий фосфор, нефтепродукты), содержанием тяжелых металлов и нефтепродуктов в ДО с одной стороны и показателями биотических индексов – с другой, был рассчитан коэффициент ранговой корреляции Спирмена. Индекс Шеннона реагирует снижением показателей в ответ на рост концентрации цинка ($r_s = -0,49$; $p < 0,05$), кобальта ($r_s = -0,60$; $p < 0,05$) и никеля ($r_s = -0,54$; $p < 0,05$) в ДО. Выявлена статистически значимая положительная связь между величиной индекса сапробности и концентрациями никеля ($r_s = 0,61$; $p < 0,01$), мышьяка ($r_s = 0,60$; $p < 0,01$), кобальта ($r_s = 0,48$; $p < 0,05$), кадмия ($r_s = 0,54$; $p < 0,05$), и цинка ($r_s = 0,60$; $p < 0,01$) в ДО. Показатели биотического индекса Вудивисса снижаются при росте концентрации цинка в ДО ($r_s = -0,51$; $p < 0,05$). Связь биотических индексов с остальными использованными для анализа показателями воды (O_2 , БПК₅, формы азота, фосфат-ионы, общий фосфор, нефтепродукты) и содержанием в ДО хрома, меди, свинца оказалась недостоверной.

Настоящее исследование, наряду с имеющимися [19, 30], в очередной раз подтверждают определенное несовершенство разработанных биологических показателей для оценки качества поверхностных вод, так как состояние донных сообществ, по-видимому, в большей степени зависит от загрязнения ДО.

В связи со стремительной индустриализацией и экономическим развитием регионов за последнее столетие загрязнение донных отложений тяжелыми металлами стало серьезной экологической проблемой из-за невозможности биологического разложения, стойкости, биоаккумуляции и токсического влияния на гидробионтов [25, 34-35, 38]. Кроме того, токсический эффект тяжелых металлов может усиливаться через пищевые цепи, что приводит к потенциально серьезным последствиям как для самых чувствительных звеньев пищевой цепи, так и, в конечном счете, для здоровья человека [31, 35].

Как отмечалось выше, в водоемы и водотоки бассейна ИВХ со сточными водами поступает большое количество нефтепродуктов [7]. Значительная часть углеводородов оседает на дно и сохраняется там в течение нескольких месяцев и даже лет. В литературном обзоре исследований о негативном влиянии нефти на макрозообентос показано, что ее седиментированные фракции вместе с различными примесями являются источником сильного токсического действия для донных организмов [24].

Таким образом, ДО в ИВХ, содержащие высокие концентрации поллютантов, могут быть источником вторичного загрязнения водной толщи.

Заключение

Качество воды ИВХ в осенний период 2025 года по гидрохимическим показателям оценивается II классом – «чистая», однако на всем протяжении водоема отмечается превышение предельно допустимых концентраций легко окисляемых органических соединений и, локально, нефтепродуктов. При этом в донных отложениях водоема аккумулировано значительное количество загрязняющих веществ. Приоритетными загрязнителями ДО являются тяжелые металлы (хром, медь, свинец, никель, цинк и кобальт), уровни которых в несколько раз превышают фоновые. Загрязнение ИВХ тяжелыми металлами существенно превышает таковые для ряда водохранилищ Волжского каскада. Почти за 20-летний период не отмечено улучшения качества воды ИВХ по содержанию тяжелых металлов в ДО и показателям макрозообентоса, но количественные характеристики кормовых объектов, потребляемых бентосоядными рыбами, остаются относительно стабильными. К проблеме загрязнения воды и ДО добавилась проблема массового расселения в водохранилище агрессивного инвазивного вида *D. polymorpha*, захватывающего свободные экологические ниши, что вызывает необходимость проведения дальнейших мониторинговых исследований водоема для оценки последствий влияния вселенца на аборигенные сообщества и состояние кормовой базы рыб.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта Президентского фонда природы № ЭКО-25-2-002634 «Макрозообентос как важнейший комплекс организмов-биоиндикаторов для оценки и прогнозирования состояния экосистемы Ижевского водохранилища».

Литература

1. Алексеев В.Р., Цалолыхин С.Я. ред. Определитель зоопланктона и зообентоса пресных вод Европейской России. Зообентос. М, СПб: КМК; 2016(2).

2. Бондаренко НА, Томберг ИВ, Пенькова ОГ, Шевелева НГ. Структурные перестройки фито- и зоопланктона под воздействием климатических изменений и антропогенной нагрузки (оз. Байкал, Россия). Биология внутренних вод. 2023;(6):727-739. DOI: 10.31857/S0320965223060050
3. Варфоломеев ВВ. Биология промысловых рыб прудов и водохранилищ Варфоломеев ВВ. Биология промысловых рыб прудов и водохранилищ Удмуртии. Ученые записки Перм. гос. пед. ин-та. Пермь. 1967;(41):46–149.
4. Гагарина ОВ, Прокашев ММ, Плеханова ВВ. О сезонных изменениях качества вод Ижевского пруда. Вестник Удмуртского университета. Серия Биология. Науки о Земле. 2018;28(2):147-155. URL: <https://journals.udsu.ru/biology/article/view/2332?ysclid=ml71eekwlc128231190>
5. Глушко ПА, Халиуллина ЛЮ. Особенности динамики фитопланктона и гидрохимических показателей воды Ижевского водохранилища в 2023-2024 гг. Наука Удмуртии. 2025;109(2):29-40. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=63893856&ysclid=ml71ggce5x579476999>
6. Дгебуадзе ЮЮ, Петросян ВГ, Хляп ЛА, ред. Самые опасные инвазионные виды России (ТОП-100). Москва: КМК; 2018. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37310782>
7. Егоров ИЕ. Хозяйственная деятельность человека и источники загрязнения. В кн.: Ижевский пруд. Ижевск: Удмуртский университет»; 2002, С. 73-77. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25998391&ysclid=ml71krhk3s99779222>
8. Захаров ВЮ. Многолетняя динамика состояния гидробионтов Ижевского водохранилища. В кн.: Материалы конференции «Седьмая научно-практическая конференция преподавателей и сотрудников УдГУ». Ижевск; 2005. Т. 2, С. 188-9.
9. Истомина АМ, Истомин СГ, Казакова НС, Поздеев ИВ, Селеткова ЕБ. Экологическое состояние Ижевского пруда. В кн.: Рыбные ресурсы Камско-Уральского региона и их рациональное использование. Пермь: Изд-во Пермского университета; 2008. С. 46-51.
10. Каргапольцева ИА. Фитофильные макробеспозвоночные устьевых областей малых рек Удмуртской Республики (на примере рек Березовка и Пазелинка). В кн.: Материалы конференций «Экология: факты, гипотезы, модели». Екатеринбург: ИЕРиЖ УрО РАН; 2016. С. :417. URL: http://irae.uran.ru/library/publications_pdf/proceedings/youth_conference_in_irae.
11. Королёв АН. Современное гидрохимическое состояние природных и антропогенных водоемов города Омска. Успехи современного естествознания. 2025;(9):75-81. DOI 10.17513/use.38431
12. Котегов БГ, Аксенова НП, Захаров ВЮ, Холмогорова НВ, Фефилова КК. Биологические и химические эффекты антропогенного эвтрофирования Ижевского водохранилища. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет»; 2013. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21995551>
13. Крылов АВ, Барышев ИА, Безматерных ДМ и соавт. Методы гидробиологических исследований внутренних вод. Ярославль: Филигрань; 2024. DOI 10.47021/monography_670cd0a47a4437.24064368
14. Курина ЕМ, Селезнев ДГ. Анализ закономерностей организации комплексов видов макрозообентоса понто-каспийского и понто-азовского происхождения в водохранилищах Средней и Нижней Волги. Экология. 2019;(1):62-71. DOI 10.1134/S0367059719010050
15. Курина ЕМ, Селезнев ДГ, Шерышева НГ. Зависимость распространения чужеродных видов макрозообентоса от типа и состава грунта в волжских и камских водохранилищах. Биология внутренних вод. 2023;(2):243-51. DOI:10.31857/S032096522302016X
16. Наумов ВИ. Характеристика и охрана хозяйственно-питьевых вод Удмуртской АССР. Ижевск: Изд-во «Удмуртия», 1978.
17. Палий ВФ. О количественных показателях при обработке фаунистических материалов. Зоол журн. 1961;60(1):3-12.
18. Постева МА, Даувальтер ВА, Слукровский ЗИ. Оценка качества вод городских озер по гидрохимическим индексам (на примере г. Мурманска). Российский журнал прикладной экологии. 2025(1):10-18. DOI 10.24852/2411-7374.2025.1.10.18
19. Степанова НЮ, Говоркова ЛК, Анохина ОК, Латыпова ВЗ. Оценка уровня загрязнения донных отложений Куйбышевского водохранилища в местах повышенного антропогенного пресса методом триады. В кн.: Актуальные проблемы водной токсикологии. Борок, 2004. С. 224-47.
20. Степанова НЮ, Латыпова ВЗ, Анохина ОК. Экологическое нормирование содержания загрязняющих веществ в донных отложениях. Методы экологических исследований. 2007;(4):42-9. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_11912664_47169167.pdf
21. Ившин ВН, Туганаев ВВ, ред. Удмуртская Республика: энциклопедия. Ижевск: Удмуртия, 2008.
22. Филинова ЕИ. Хирономиды в макрозообентосе Волгоградского водохранилища. Энтомологические и паразитологические исследования в Поволжье. 2020;(17):70-5.
23. Холмогорова НВ, Пушина ОА. Современное состояние макрозообентоса Ижевского водохранилища. Наука Удмуртии. 2023;(2):138-45. URL:<https://www.elibrary.ru/item.asp?id=59553444>
24. Холмогорова НВ. Динамика структуры макрозообентоса в условиях нефтяного загрязнения донных отложений малых рек Удмуртии. Вестник Томского государственного университета. 2007;304:187-190. URL:https://www.elibrary.ru/download/elibrary_12225151_76594674.pdf
25. Чуйко ГМ, Подгорная ВА, Томилина ИИ, Ложкина РА, Законнов ВВ, Гапеева МВ. Комплексная оценка экотоксикологического состояния водохранилищ Средней и Нижней Волги методами

- биодиагностики и анализа содержания тяжелых металлов в донных отложениях. Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 2022;100(103):89-96. DOI: 10.47021/0320-3557-2022-89-96
26. Цалолыхин СЯ, ред. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 3. Паукообразные. Низшие насекомые. СПб.: ЗИН РАН; 1997.
 27. Цалолыхин СЯ, ред. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 4. Высшие насекомые: Двукрылые. СПб.: ЗИН РАН; 1999.
 28. Цалолыхин СЯ, ред. Определитель пресноводных беспозвоночных России и сопредельных территорий. Т. 5. Высшие насекомые: ручейники, чешуекрылые, жесткокрылые, сетчатокрылые, большекрылые, перепончатокрылые. СПб.: ЗИН РАН, 2001.
 29. Шитиков ВК, Розенберг ГС, Зинченко ТД. Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения. Кн. 1. М.: Наука; 2005. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19491217>
 30. Allan JD, Castillo MM. Stream Ecology: Structure and Function of Running Waters. Dordrecht: Springer; 2007. DOI:10.1007/978-1-4020-5583-6
 31. Hammerschmidt CR, Fitzgerald WF. Bioaccumulation and trophic transfer of methylmercury in Long Island Sound. Arch Environ Contam Toxicol. 2006;51:416-24. DOI:10.1007/s00244-005-0265-7
 32. Kholmogorova NV, Kargapoltseva IA. The species composition of macroinvertebrates and water quality **assessment using the macrozoobenthos organisms of the Izhevsk reservoir. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019;321(1):4. DOI:10.1088/1755-1315/321/1/012061
 33. Kownacki A. Taxocens of Chironomidae in streams of the Polish Hight Tarta Mts. Acta Hydrobiol. 1971;13(2):439-64. URL: <https://scholar.google.com/citations?user=7tFNxhsAAAAJ&hl=en>
 34. Levit RL, Shigaeva TD, Kudryavtseva VA. Heavy metals in macrozoobenthos and sediments of the coastal zone of the eastern Gulf of Finland. Russ J Gen Chem. 2020;90(13):2700-7. DOI: 10.1016/j.envpol.2011.06.011
 35. Lim DI, Choi JW, Shin HH, Jeong DH, Jung HS. Toxicological impact assessment of heavy metal contamination on macrobenthic communities in southern coastal sediments of Korea. Marine Pollut Bull. 2013;73(1):362-8. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2013.05.037
 36. Pantle R, Buck H. Die biologische Überwachung der Gewässer und die Darstellung der Ergebnisse. Gas Wasserfach. 1955;96(18).
 37. Shannon CE, Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana: Univ. of Illinois Press; 1949.
 38. Tam N, Wong Y. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps. Environ Pollut. 2000;110:195-205. DOI: 10.1016/s0269-7491(99)00310-3.
 39. Tamrakar RK, Butoliya S, Upadhyay K. Water pollution: sources, causes, and effects. In: Current Advancements in Nanomaterials for Wastewater Remediation. Elsevier; 2026. P. 31-50.
 40. Woodiwiss FS. The biological system of stream classification used by the Trent river board. Chem Industry. 1964:443-7.