

УДК 556.11

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ ВОДОХРАНИЛИЩ ВЕРХНЕВОЛЖСКОГО И КАМСКОГО КАСКАДОВ

© 2024 г. С. В. Ясинский^{1,*}, Е. С. Гришанцева^{1,2}, А. М. Расулова³, М. А. Фасахов⁴,
А. А. Шайдулина⁴, Е. А. Кашутина¹

¹Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет,
Москва, Россия

³Институт озероведения РАН — СПб ФИЦ РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

*e-mail: yasisergej@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.08.2024 г.

После доработки 27.08.2024 г.

Принята к публикации 18.10.2024 г.

Статья посвящена оценке качества воды Верхневолжского и Камского каскадов водохранилищ бассейна Волги в разные по водности годы в современный период. Определены основные факторы, влияющие на формирование качества воды в водохранилищах, на которое значительное влияние оказывают поступление загрязняющих веществ с водосборов из точечных и диффузных антропогенных источников. Материалами для работы послужили данные государственного водохозяйственного мониторинга, осуществляемого лабораториями организаций, подведомственных Верхневолжскому и Камскому Бассейновым водным управлениям Росводресурсов РФ. При оценке качества и экологического состояния поверхностных вод, а также для сравнительного анализа степени загрязнения водных объектов применялись интегральные индексы: индекс загрязненности воды (ИЗВ) и удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ), рассчитанные для лет различной водности. Оценка водности лет определялась по эмпирическим кривым обеспеченности годового притока воды к отдельным водохранилищам. Анализ разностно-интегральных кривых годового притока к Верхневолжскому и Камскому каскадам водохранилищ показал их асинхронность с начала XXI в. Для каждого из водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов выявлены приоритетные для контроля вещества, обеспечивающие наибольший вклад в ухудшение качества воды. Применение методики расчета УКИЗВ и ИЗВ показало, что водохранилища каскадов характеризуются неудовлетворительным состоянием. Ни в одном из водохранилищ качество воды не соответствует рыбохозяйственным нормативам. По категории УКИЗВ качество воды Камских водохранилищ соответствует категории “загрязненное”, а водохранилищ Верхневолжского каскада — “очень загрязненное”. В отдельные годы в Ивановском и Угличском водохранилищах качество воды оценивается как “грязное”. По категории ИЗВ картина аналогичная. Не выявлено влияние водности притока на качество воды в этих водных объектах. Сопоставление результатов оценки качества воды, выполненное по массивам данных Росводресурсов и Росгидромета, продемонстрировало достаточно близкое их совпадение.

Ключевые слова: водохранилища, каскады, качество воды, загрязняющие вещества, интегральные индексы, годовой приток, годы разной водности, разностно-интегральные кривые, Верхняя Волга, Кама

DOI: 10.31857/S2587556624060067, EDN: AKBNQR

ВВЕДЕНИЕ

Химический состав воды водных объектов является одним из основных факторов, определяющих состояние водных экосистем, возможные виды водопользования и стратегию охраны и восстановления водных ресурсов, а также возможные экологические риски. Основными фак-

торами формирования гидрохимического режима водных масс водохранилищ являются:

1. морфометрические характеристики водохранилища: объем, распределение глубин, площадь акватории, изрезанность береговой линии;
2. степень зарегулированности водохранилища (многолетнее или сезонное), определяющая водообмен в водохранилище;

3. режим притока воды с вышележащих участков русла и сбросов на нижележащие участки;
4. гидродинамические параметры: распределение скоростей течения по объему водохранилища;
5. климатический режим и метеорологические условия конкретных лет;
6. природные особенности водосборов водохранилищ (геологическое строение, ландшафтная структура водосборов);
7. антропогенная деятельность на водосборах;
8. береговая абразия;
9. поступление веществ с жидкими и твердыми осадками из атмосферы на водосбор и акваторию водохранилища;
10. внутриводоемные процессы в толще воды;
11. поступление вторичного загрязнения из донных отложений.

Антропогенные источники поступления веществ с водосборов делятся на диффузные (рассредоточенные) и точечные (сточные воды предприятий). Считается, что точечные источники контролируются государственными органами, предприятия отчитываются за проведенные сбросы. Однако на практике система контроля и отчетности 2-ТП (водхоз) носит заявительный характер, а ряд предприятий вообще выведен даже из-под такого контроля (Лукьянов, Коронкевич, 2022). К диффузным антропогенным источникам относятся поля, промышленная и жилая застройка, любые преобразованные человеком участки водосборов, на которых отсутствуют или недостаточны по объему и качеству системы очистки стекающих вод. Однако, как показали работы, выполненные по программе “Оздоровление Волги”, вклад диффузных источников в поступление загрязняющих веществ в водные объекты в бассейне Волги превышает 60%, а на отдельных участках водосборов может достигать до 90% и более (Диффузное ..., 2020). Именно с диффузным загрязнением связывают отсутствие кардинального улучшения состояния воды каскада волжских водохранилищ, несмотря на продолжавшееся почти до последнего времени длительное сокращение объемов промышленного производства и соответственно объемов использования воды и сбросов промышленных предприятий в бассейне Волги (Диффузное ..., 2020). Несмотря на значительный вклад диффузного поступления загрязняющих веществ в водные объекты, оно практически не контролируется современными системами мониторинга природных ресурсов и не является предметом отчетности природоохранных ведомств (Ясинский и др., 2023).

Важнейший фактор формирования гидрохимического режима водохранилища — это величина объема воды в нем в текущий момент времени, который способен разбавить поступающие в него из разных источников загрязняющие ве-

щества. Чем выше коэффициент разбавления (отношение объема воды к объему поступления загрязняющих веществ), тем благоприятнее экологическая ситуация (Антропогенные ..., 2003).

Цель работы — на основе данных сертифицированных гидрохимических лабораторий организаций, подведомственным Бассейновым водным управлениям Росводресурсов РФ, определить характерные загрязняющие вещества и оценить актуальное качество воды водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов в годы разной водности с использованием применяющихся в практике мониторинга гидрохимических показателей.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Волжский бассейн по водохозяйственному районированию, представленному в Водном кодексе РФ — Закон № 76 ФЗ, разделен на 4 бассейновых округа: Верхневолжский, Окский, Камский и Нижневолжский. Основными водными объектами Верхневолжского бассейнового округа являются: Ивановское, Угличское, Рыбинское, Горьковское и Чебоксарское водохранилища. В Камском бассейновом округе такими водными объектами являются Камское, Воткинское и Нижнекамское водохранилища. Расположенные друг за другом водохранилища в каждом из этих бассейновых округов, образуют Верхневолжский и Камский каскады водохранилищ соответственно. Чебоксарское водохранилище у г. Новочебоксарска и Нижнекамское водохранилище у г. Набережные Челны являются последними водными объектами в системе Верхневолжского и Камского каскадов (рис. 1). Водный и гидрохимический режимы, экологическое состояние и функционирование самого крупного водохранилища на Европейской территории России — Куйбышевского у г. Тольятти (площадь поверхности 6450 км², объем 58 км³) в значительной степени обусловлены поступлением воды через гидроагрегаты плотин Чебоксарского и Нижнекамского водохранилищ. Их водные массы в определенной степени содержат в себе информацию о специфике и динамике гидролого-геохимического режимов расположенных выше них водохранилищ. Эти режимы также обусловлены многими факторами и процессами, происходящими как в этих водных объектах, так и на их водосборах в условиях значительной антропогенной нагрузки. Бассейны Волги и Камы — одни из наиболее густонаселенных и промышленно развитых регионов страны (Демин, 2023).

Различия в морфологических характеристиках, в водном балансе и в водообмене этих водохранилищ показаны в работах (Вуглинский, 1991; Измайлова и др., 2023; Эдельштейн, 1998). Сведения о концентрациях загрязняющих веществ

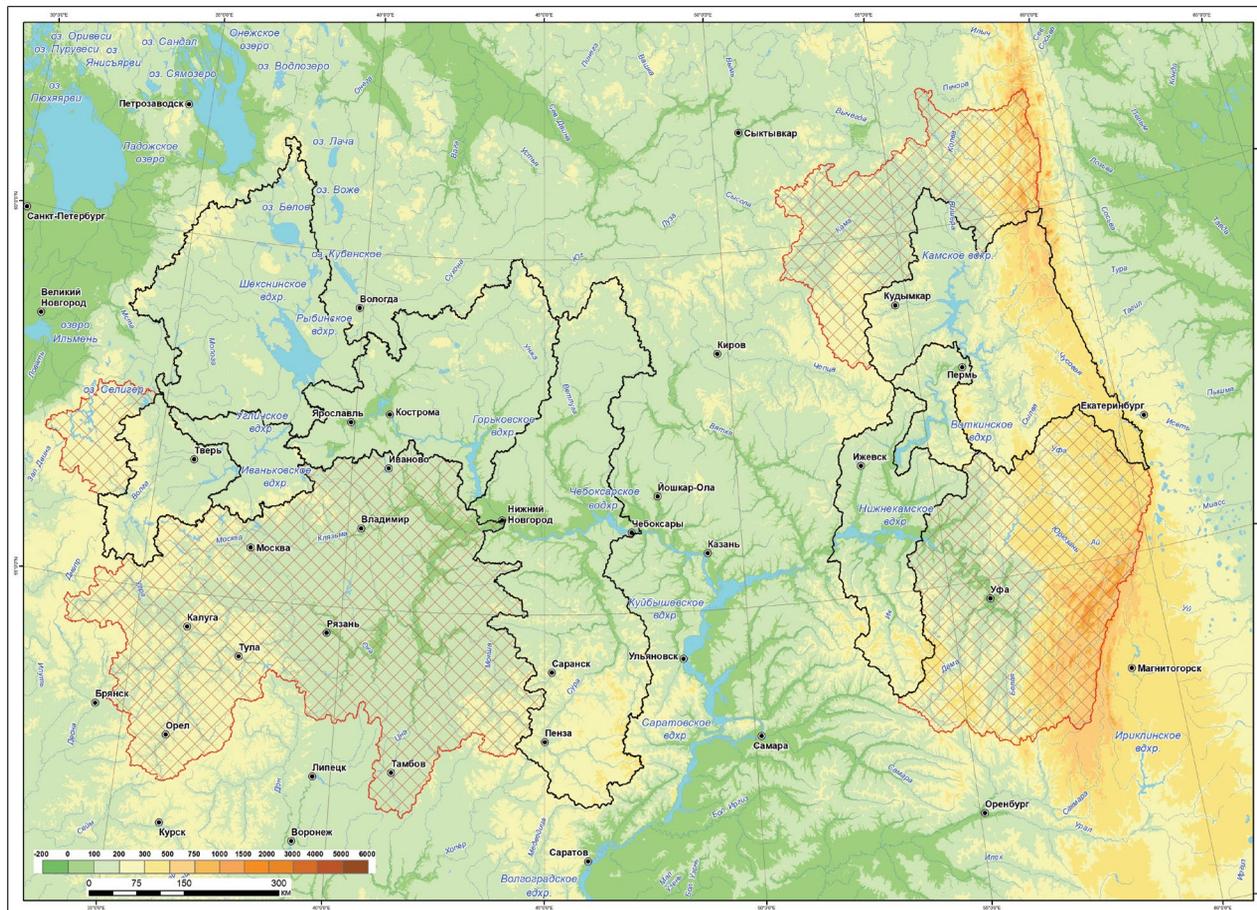


Рис. 1. Верхневолжские и Камские водохранилища и их водосборы. Черным контуром выделены участки водосборных бассейнов, для которых выполнена экспликация, красной штриховкой — нет данных об экспликации.

и гидрохимическом режиме рассматриваемых водохранилищ вплоть до начала XXI в. содержатся в (Болгов и др., 2008; Водоохранилища Верхней Волги, 1975; Дебольский и др., 2010; Ивановское ..., 1978; Томилина и др., 2018). Характеристика процесса абразии берегов водохранилищ приведена в (Соболь, 2022). Сведения о ежегодном накоплении в донных отложениях массы взвешенных, органических и биогенных веществ содержатся в (Буторин и др., 1975; Зимина, Законнов, 1982). Оценки средней ежегодной первичной продукции и деструкции органического вещества в водохранилищах даны в (Водоохранилища и ..., 1986; Романенко, 1984).

На рис. 2 показаны различия в объемах рассматриваемых водохранилищ. Самое большое — Рыбинское водохранилище, осуществляющее многолетнее регулирование стока. Все остальные водохранилища — сезонного регулирования. Регулирующий объем Чебоксарского и Нижнекамского водохранилищ по изначальным проектам должен был быть больше. Однако в силу ряда причин проекты при реализации были изменены: проектные нормальные подпорные уровни (НПУ) в 68 м БС (Балтийская система высот) при строительстве не были достигнуты. Сейчас

эксплуатация ведется на НПУ 63 м БС для Чебоксарского и 63.3 м БС для Нижнекамского водохранилищ.

Различны также и другие характеристики водосборов и самих рассматриваемых водохранилищ, непосредственно влияющие на миграцию химических веществ на водосборах и антропогенную нагрузку на водоемы. В табл. 1 приведена экспликация частных водосборов водохранилищ для каждой ветви отдельно и всего каскада Верхневолжских и Камских водохранилищ в пределах водосборов, но без учета крупных притоков — Оки, Белой, Волги до Ржева, Камы до Бондюга и Вишеры до Рябинино. Участки водосборов, для которых оценена экспликация земель, выделены на рис. 1 черными границами. Приведенная выборочная экспликация в первом приближении дает представление о распределении угодий на всех рассматриваемых водосборах и позволяет судить о ландшафтной структуре водосборов — важнейшем факторе формирования стока воды и других веществ с водосбора.

Наибольшую лесистость имеют водосборы Камского и Горьковского водохранилищ — около 80% их территории занято лесом. Наименьшая

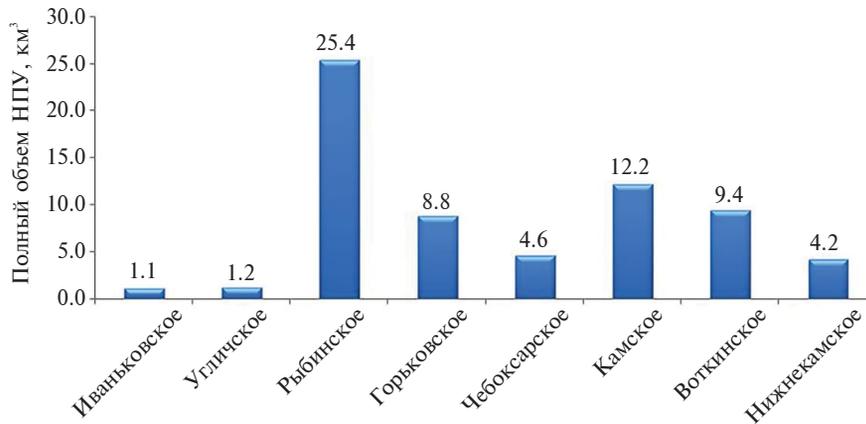


Рис. 2. Объемы водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов при нормальном подпорном уровне. Составлено по: (Измайлова и др., 2023).

лесистость на водосборе Нижнекамского (35%) и Чебоксарского (59%) водохранилищ. Наименее распаханы водосборы Рыбинского, Горьковского и Камского водохранилищ (до 4%), наиболее — водосборы Нижнекамского (42%) и Чебоксарского (23%). Довольно высокая доля урбанизированной территории в выделенной

части бассейна Камского водохранилища (около 8%) связана с частными водосборами рр. Чусовой и Сылвы. Степень урбанизации водосборов Верхневолжских водохранилищ в пределах рассматриваемой территории меньше — от 0.2% на водосборе Рыбинского водохранилища, до 1.5% на водосборе Угличского.

Таблица 1. Экспликация частных водосборов водохранилищ и каскадов водохранилищ Верхней Волги и Камы

Водохранилище	Площадь водосбора, занятого видом поверхности, %							Площадь водосбора*, тыс. км²
	Водные объекты	Лес	Болото	Пахотные земли	Сельские населенные пункты	Города	Луга	
Верхневолжский каскад								
Иваньковское	2.0	65.3	0.4	8.3	2.3	1.2	20.5	29.3
Угличское	2.0	66.7	0.1	7.3	4.1	1.5	18.3	19.5
Рыбинское	7.7	68.4	0.5	2.2	0.8	0.2	20.2	90.9
Горьковское	2.2	79.5	0.2	4.0	1.2	0.9	12.0	80.7
Чебоксарское	1.4	59.5	0.3	23.2	2.0	0.9	12.7	132.1
Камский каскад								
Камское	2.5	82.8	0.1	4.1	1.0	8.0	1.5	90.9
Воткинское	6.9	63.0	0.1	10.0	2.3	4.5	13.2	16.1
Нижнекамское	2.8	35.2	0.9	41.8	2.7	1.8	14.8	51.2
Каскады интегрально								
Верхневолжская ветвь водохранилищ	3.3	67.2	0.3	11.3	1.7	0.8	15.4	352.5
Камская ветвь водохранилищ	3.0	65.3	0.4	16.9	1.7	5.7	7.0	158.2
Верхневолжские и камские водохранилища	3.2	66.6	0.4	13.0	1.7	2.3	12.8	510.7

Примечания. * В водосборе Ивановского водохранилища не учитывается водосбор Волги до створа Ржев, в водосборе Чебоксарского водохранилища — бассейн р. Оки, в водосборе Камского водохранилища — водосбор р. Камы до Бондюга и р. Вишеры до Рябиново, в водосборе Нижнекамского водохранилища — бассейн р. Белой. Всего при оценке экспликации не учтен участок водосборов Верхневолжских водохранилищ площадью 263.2 тыс. км², Камских водохранилищ — 215.2 тыс. км².

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалами для работы послужили данные государственного водохозяйственного мониторинга, осуществляемого лабораториями организаций, подведомственных Бассейновым водным управлениям (БВУ) Агентства водных ресурсов РФ (Росводресурсов РФ) на всех крупных водохранилищах страны. Мониторинг на верховолжских и камских водохранилищах включает отбор поверхностных и придонных проб воды и донных отложений зимой, весной, летом и осенью от 5 до 11 раз в год в нескольких створах по длине водохранилища (до 12–15 точек) и проведение их химического анализа в сертифицированных лабораториях для определения содержания химических веществ (от 22 до 40 показателей в разных водохранилищах). Информация мониторинга была предоставлена официально по запросу Института географии РАН Верхневолжским и Камским бассейновыми водными управлениями Росводресурсов РФ. Данные включали информацию о гидрохимических показателях Ивановского и Горьковского водохранилищ в 2005–2022 гг., Угличского — в 2009–2022 гг., Рыбинского — в 2010–2022 гг., Чебоксарского — в 2004–2022 гг., Камского и Воткинского — в 2002–2022 гг., Нижнекамского — в 2002–2022 гг.

Данные о притоке воды к водохранилищам получены на сайте Центра Регистра и Кадастра¹.

Оценка водности лет определялась по эмпирическим кривым обеспеченности годового притока воды к отдельным водохранилищам. Предполагалось, что маловодные годы соответствуют притоку обеспеченностью более 66.7%, многоводные — притоку менее 33.3% обеспеченности, а средние по водности — от 33.3 до 66.7% включительно.

Для оценок фаз водности использовались разностно-интегральные кривые.

Информация о ландшафтной структуре водосборов получена с использованием данных спутниковых снимков Sentinel-2 с применением методов дешифрирования, разработанных в Институте географии РАН (Ясинский и др., 2019).

При оценке качества и экологического состояния поверхностных вод, а также для сравнительного анализа степени загрязнения водных объектов применялись интегральные индексы, учитывающие превышение концентраций приоритетных загрязняющих веществ над предельно допустимой концентрацией (ПДК) — гидрохимический индекс загрязненности воды (ИЗВ) и удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ). Индекс ИЗВ применяется с 1986 г. в соответствии с «Временные методические указания, по комплексной оценке, качества

поверхностных и морских вод» Госкомгидромета СССР (1986). ИЗВ — один из наиболее часто используемых в экологической практике показателей для оценки качества воды водных объектов (Рисник и др., 2012). Расчет ИЗВ для поверхностных вод производится по формуле:

$$ИЗВ = \frac{1}{6} \frac{\sum_i C_i}{ПДК}, \quad (1)$$

где C_i — концентрация компонента i или значение физико-химического параметра i ; $ПДК_i$ — предельно-допустимая концентрация, установленная для соответствующего показателя i ; число “6” в знаменателе формулы (1) определяет число компонентов, берущихся для расчета ИЗВ (Временные ..., 1986). В расчет ИЗВ согласно этим указаниям обязательно включается информация о нормированном содержании растворенного кислорода и о нормированном БПК₅. ПДК для разных диапазонов БПК₅ различно (для БПК₅ менее 3 мг О₂/л ПДК равно 3 мг О₂/л, БПК₅ от 3 до 15 мг О₂/л соответствует ПДК, равному 2 мг О₂/л, а БПК₅ свыше 15 мг О₂/л — ПДК = 1 мг О₂/л). Содержание растворенного кислорода нормируется иначе, чем прочие показатели. Вместо отношения $C_i/ПДК_i$ используется $ПДК_i/C_i$, причем чем меньше значения содержания кислорода C_i , тем больше $ПДК_i$.

Оставшиеся четыре компонента для каждого водного объекта выбираются как максимальные по соотношениям $C_i/ПДК_i$, независимо от того, превышают эти показатели ПДК или нет. По полученной величине ИЗВ водному объекту присваивается класс загрязненности воды. Поскольку в разных источниках существуют разногласия в границах диапазонов для установления класса качества воды (Шитиков и др., 2003, с. 126), в табл. 2 приведены использовавшиеся в работе значения, основанные на (Временные ..., 1986).

Методика комплексной классификации водных объектов по УКИЗВ, разработанная Гидрохимическим институтом Росгидромета и утвержденная ведомственным нормативом РД 52.24.643–2002, позволяет дать интегральную оценку качества воды по совокупности находящихся в ней загрязняющих веществ и частоте превышений ПДК. Предварительно, в соответствии с (Методические ..., 2003), оценивается коэффициент комплексности загрязненности воды, показывающий долю показателей, превышающих ПДК, из всего числа измеряемых показателей. При коэффициенте комплексности загрязненности для водного объекта более 10% метод комплексной оценки качества воды по УКИЗВ рекомендован к применению.

При расчете УКИЗВ в соответствии с методикой (Методические ..., 2003) определяют баллы кратности превышения ПДК на основе факти-

¹ <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения 10.09.2024).

Таблица 2. Классы качества воды по ИЗВ

Класс качества воды	Характеристика	Величина ИЗВ
I	Очень чистая	менее или равно 0.3
II	Чистая	более 0.3 до 1
III	Умеренно загрязненная	более 1 до 2.5
IV	Загрязненная	более 2.5 до 4
V	Грязная	более 4 до 6
VI	Очень грязная	более 6 до 10
VII	Чрезвычайно грязная	более 10

ческих концентраций для 15 строго регламентированных показателей (растворенный кислород, БПК₅, ХПК, фенолы, нефтепродукты, нитрит-ионы, нитрат-ионы, аммоний-ион, железо общее, медь, цинк, никель, марганец, хлориды, сульфаты), а также баллы повторяемости случаев превышения ПДК этих же показателей. Для Камских водохранилищ из-за отсутствия измерений содержания марганца в воде вместо него для расчетов использовалась информация о содержании свинца. Для растворенного кислорода, в отличие от других показателей, в расчетах использовалось не отношение содержания вещества к ПДК, а наоборот, отношение ПДК к содержанию кислорода в воде, поскольку требовалось учесть недонасыщение воды кислородом.

В методике при расчете УКИЗВ учитывается наличие числа критических показателей загрязненности воды (КПЗ), которые обуславливают перевод воды по степени загрязненности в класс “очень грязная”. Критическим показателем загрязненности считается такой показатель, для которого наблюдается устойчивая либо характерная загрязненность высокого или экстремально высокого уровней загрязненности. При этом вода по своему качеству по этому показателю оценивается как “очень грязная” и “экстремально грязная” (Методические ..., 2003). Критический показатель рассчитывается для каждого ингредиента как произведение функций величин наблюдаемых концентраций загрязняющих веществ и частоты их обнаружения. Показатель становится критическим, когда его значение превышает заданный в (Методические ..., 2003) критический уровень.

По рассчитанной величине УКИЗВ определяют класс качества воды:

- 1 класс — условно чистая;
- 2 класс — слабо загрязненная;
- 3 класс: разряд “а” — загрязненная; разряд “б” — очень загрязненная;
- 4 класс: разряд “а” — грязная; разряд “б” — грязная; разряд “в” — очень грязная; разряд “г” — очень грязная;
- 5 класс — экстремально грязная.

Несмотря на удобство оценки качества воды с помощью индексов загрязнения (УКИЗВ и ИЗВ), ряд авторов отмечает недостатки данного подхода (Данилов-Данильян и др., 2019; Иванникий и др., 2020; Тимофеева, Фрумин, 2015). К ним, в частности, относятся: ограниченное число анализируемых химических показателей, неучет региональных особенностей геохимических ландшафтов, отсутствие учета типа природопользования и антропогенного воздействия на экосистему водоема, а также условий миграции химических веществ и элементов в разных ландшафтах, возможность синергизма загрязняющих веществ. Показатель не отражает прямую трофический статус водоема. В связи с этим для оценок состояния экосистемы водоема часто рассматривают каждый из химических показателей отдельно и соотношения между ними с учетом региональных особенностей водного объекта.

Для расчетов ИЗВ использовались предварительно осредненные за год показатели содержания веществ по всем измерениям для каждого из водохранилищ. Для расчетов УКИЗВ для каждого из водохранилищ вначале осреднялись данные измерений за каждый месяц года, а далее по ним оценивался среднегодовой УКИЗВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Фазы водности Верхневолжского и Камского каскадов

Приток воды в каждый каскад асинхронен друг другу (рис. 3). Для рассматриваемых в работе Верхневолжских водохранилищ четко выделяются две ветви цикла водности притока в водохранилище: с 2003 по 2013 г. — фаза повышенного притока, а после 2013 г. — сниженного. Для Камских водохранилищ все в противофазе: с 2003 по 2013 г. отмечалась фаза пониженного притока, далее сменившаяся фазой повышенного притока. Однако с начала 2020-х годов наблюдается уменьшение притока в водохранилища Камского каскада. Причинами такой асинхронности являются значительные различия в физико-географических характеристиках и климатическом режиме водосборов этих водохранилищ.

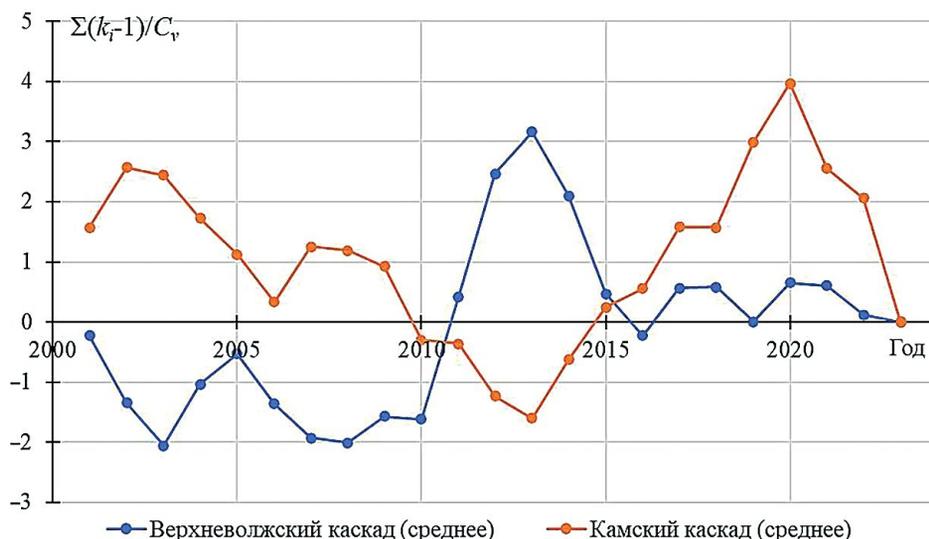


Рис. 3. Осредненные разностно-интегральные кривые притока воды в водохранилища Верхневолжского и Камского каскадов.

*Многоводные и маловодные годы
в Верхневолжском и Камском каскадах
с начала XXI в.*

Для водохранилищ Верхневолжского каскада в качестве характерных для большей части водохранилищ лет выбраны многоводный 2012 г., маловодный 2016 г. и средний по водности 2018 г. Для Камского каскада в качестве многоводного года был взят 2019 г., маловодного — 2021 г. и 2014 г. — как средний по водности год, причем для характеристики водности года авто-

ры ориентировались на приток к Камскому водохранилищу (Калинин и др., 2025). Параметры притока воды к водохранилищам в годы разной водности приведены в табл. 3.

В табл. 4–6 для разных по водности лет для изучаемых водохранилищ приведены показатели, используемые для расчетов ИЗВ и УКИЗВ. Дополнительно указана информация о содержании взвешенных веществ. В таблицах содержится информация о среднегодовых значениях показателей, а также о минимальных и максимальных

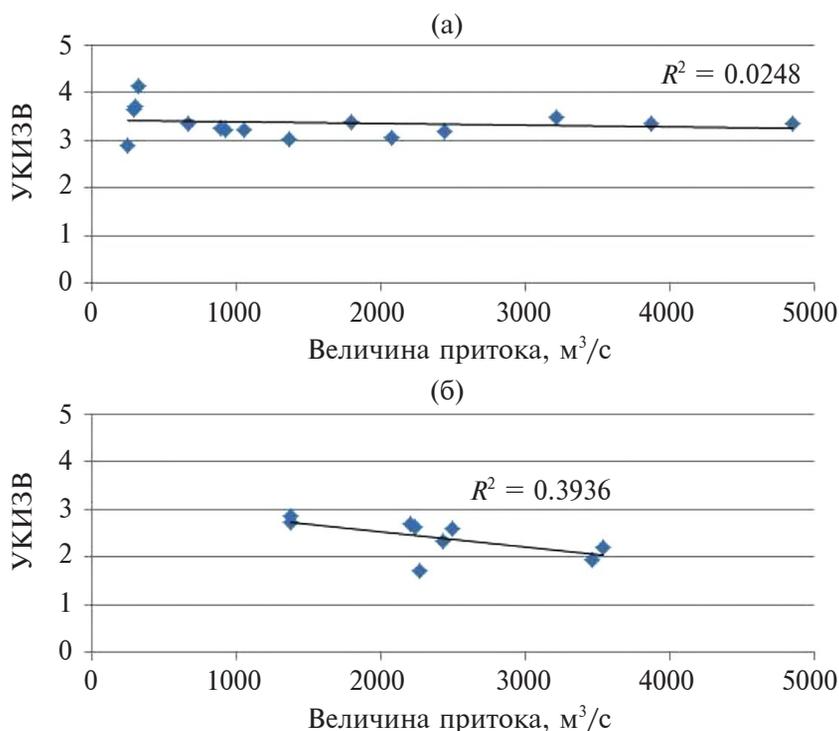


Рис. 4. Зависимость УКИЗВ от величины водности года (среднегодового притока воды к водохранилищу, м³/с): для Верхневолжских (а) и Камских (б) водохранилищ.

Таблица 3. Поступление воды в водохранилища Верхневолжского и Камского каскадов в годы разной водности

Водохранилище	Год	Приток воды в водохранилище за год	
		Объем, км ³	Обеспеченность, %*
Средний по водности год			
Иваньковское	2018	9.4	58.3
Угличское	2018	10.5	62.5
Рыбинское	2018	38.1	33.3
Горьковское	2018	56.8	41.7
Чебоксарское	2018	122.2	33.3
Камское	2014	58.4	47.6
Воткинское	2014	61.0	
Нижекамское	2014	93.5	
Многоводный год			
Иваньковское	2012	21.0	8.3
Угличское	2012	28.1	8.3
Рыбинское	2012	41.4	25.0
Горьковское	2012	77.1	4.2
Чебоксарское	2012	153.1	4.2
Камское	2019	79.5	4.9
Воткинское*	2019	77.0	
Нижекамское*	2019	109.7	
Маловодный год			
Иваньковское	2016	7.9	79.2
Угличское	2016	9.7	75.0
Рыбинское	2016	29.5	70.8
Горьковское	2016	43.2	75.0
Чебоксарское	2016	101.5	70.8
Камское	2021	43.9	95.2
Воткинское	2021	43.9	
Нижекамское	2021	71.5	

Примечание: * водность года установлена по притоку к Камскому водохранилищу.

за год среднемесячных их значениях, что позволяет судить о внутригодовой их динамике. Приведено число измерений показателей (N), на основании которых выполнены расчеты. Значительное число измерений позволяет судить о достоверности выполненных оценок.

*Оценка качества воды
по комплексным показателям*

В табл. 7 приведены результаты оценок качества воды в среднем за год по ИЗВ для Верхневолжского и Камского каскадов в годы разной

водности. При оценке качества воды по величине ИЗВ состояние воды всей Верхневолжской ветви водохранилищ оценивается в основном как “загрязненное”, а в верховьях (в Иваньковском и Угличском водохранилищах) в отдельные годы как “грязное”. Наибольшее превышение относительно ПДК для всех водохранилищ Верхневолжской ветви характерно для марганца (лидер по превышению практически везде), железа общего и ХПК, а также для меди. Исключение — Иваньковское водохранилище, где показатель содержания нефтепродуктов превышает относительное содержание меди. Воды водохранилищ Камского каскада во все годы характеризуются как “умеренно загрязненные”, то есть они чище, чем Верхневолжские. Однако важно подчеркнуть, что здесь не измерялось содержание марганца, вносящего важнейший вклад в показатели загрязнения Верхневолжских водохранилищ. Для Камских водохранилищ характерные загрязняющие вещества для расчетов ИЗВ те же, что и на Верхневолжских — железо общее, медь, ХПК. Место марганца в списке характерных загрязняющих веществ занимают фенолы. Самое чистое из Камских водохранилищ по показателю ИЗВ — Нижекамское.

По оцененным значениям коэффициентов комплексности все водохранилища во все исследуемые годы отнесены ко II категории с повышенной комплексностью загрязненности. Коэффициенты комплексности находятся в диапазоне от 30 до 40% в Верхневолжских водохранилищах и несколько ниже (от 20%) — в Камских.

Из рассмотренных показателей главное загрязняющее вещество *Верхневолжских водохранилищ* (среднее содержание более всего превышало ПДК) — марганец (до 17–19 ПДК в Иваньковском и Угличском водохранилищах). Везде было значительно превышено содержание общего железа, повсеместно превышены показатели содержания органики (ХПК и БПК₅). Повышено содержание аммоний-иона (кроме Чебоксарского и Горьковского водохранилищ в средние и маловодные годы). Везде, кроме Иваньковского водохранилища, превышено содержание меди. Эпизодически в маловодные и средние по водности годы в Верхневолжских водохранилищах, кроме Рыбинского, были увеличены по сравнению с ПДК нитриты. В Иваньковском водохранилище наблюдался небольшой дефицит растворенного кислорода. Для Горьковского и Чебоксарского водохранилищ характерно постоянное увеличение содержания цинка. В Иваньковском и Угличском водохранилищах постоянно отмечалось повышенное содержание нефтепродуктов, а в маловодные и средние по водности годы были превышены концентрации фенолов.

Таблица 4. Характерные концентрации загрязняющих веществ и значения гидроксидных показателей в водохранилищах для многоводного года (для водохранилищ Верхневолжского каскада 2012 г., для Камского каскада 2019 г.)

Показатель	ПДК, мг/л	Иваньковское	Угличское	Рыбинское	Горьковское	Чебоксарское	Камское	Воткинское	Нижнекамское
Число измерений N		40	79	107	210	148	48	88	184
Взвешенные вещества, мг/л	нет	$\frac{8.21}{3-29.5}$	$\frac{3.24}{0.46-13.3}$	$\frac{0.03}{0-0.17}$	$\frac{0.95}{0-3.36}$	$\frac{4.01}{1.29-8.2}$	$\frac{8.72}{4.82-14.72}$	$\frac{10.49}{4.71-25.54}$	$\frac{12.99}{5.90-25.20}$
Растворенный кислород, мг/л	4	$\frac{6.69}{3.38-10.63}$	$\frac{8.7}{6.85-9.66}$	$\frac{9.26}{8.75-10.11}$	$\frac{9.6}{8.78-11.89}$	$\frac{8.98}{8.46-9.85}$	$\frac{8.96}{7.68-9.95}$	$\frac{9.11}{8.07-10.35}$	$\frac{8.92}{7.34-10.49}$
БПК ₅ , мг/л	2.1	$\frac{1.65}{0.61-4.65}$	$\frac{1.91}{0.47-4.82}$	$\frac{1.55}{0-3.89}$	$\frac{2.05}{1.1-3.51}$	$\frac{2.18}{0.4-4.9}$	$\frac{0.81}{0.55-1.10}$	$\frac{0.87}{0.55-1.20}$	$\frac{3.50}{1.24-5.05}$
ХПК, мг/л	15	$\frac{32.9}{7-64}$	$\frac{35.3}{15.3-58.5}$	$\frac{38.27}{25.3-71.2}$	$\frac{36.14}{30-41.7}$	$\frac{31.28}{13-56.4}$	$\frac{30.44}{17.88-41.44}$	$\frac{32.89}{24.48-40.94}$	$\frac{22.27}{12.55-31.55}$
Фенолы, мг/л	0.001	$\frac{5 \cdot 10^{-4}}{0-5 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{3 \cdot 10^{-5}}{0-1.5 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{3.3 \cdot 10^{-5}}{0-1.6 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0.0001}{0-0.00042}$	$\frac{0.00041}{0-0.0024}$	$\frac{0.003}{0.002-0.005}$	$\frac{0.003}{0.002-0.004}$	$\frac{0.002}{0.0-0.003}$
Нефтепродукты, мг/л	0.05	$\frac{0.06}{0.04-0.08}$	$\frac{0.03}{0.02-0.07}$	$\frac{0.01}{0.01-0.02}$	$\frac{0.01}{0.01-0.02}$	$\frac{0.02}{0.01-0.05}$	$\frac{0.05}{0.04-0.08}$	$\frac{0.04}{0.04-0.07}$	$\frac{0.05}{0.04-0.05}$
Нитриты, мг/л	0.08	$\frac{0.033}{0.016-0.088}$	$\frac{0.04}{0-0.08}$	$\frac{0.049}{0-0.296}$	$\frac{0.043}{0.02-0.062}$	$\frac{0.054}{0.004-0.355}$	нет данных	нет данных	$\frac{0.02}{0.02-0.04}$
Нитраты, мг/л	40	$\frac{2.73}{0.13-15.2}$	$\frac{1.4}{0.2-3.88}$	$\frac{1.62}{0.43-4.69}$	$\frac{1.358}{0.498-2.957}$	$\frac{2.162}{0-7}$	$\frac{0.90}{0.33-2.73}$	$\frac{0.92}{0.64-1.73}$	$\frac{1.75}{0.71-2.81}$
Аммоний-ион, мг/л	0.5	$\frac{0.73}{0.4-1}$	$\frac{0.6}{0.38-0.86}$	$\frac{0.82}{0.58-0.98}$	$\frac{0.58}{0.33-0.75}$	$\frac{0.42}{0.28-0.65}$	$\frac{0.33}{0.15-0.57}$	$\frac{0.25}{0.11-0.49}$	$\frac{0.34}{0.25-0.48}$
Железо общее, мг/л	0.1	$\frac{0.35}{0.08-0.58}$	$\frac{0.44}{0.11-0.65}$	$\frac{0.67}{0.5-0.83}$	$\frac{0.54}{0.31-0.68}$	$\frac{0.34}{0.23-0.51}$	$\frac{0.41}{0.10-0.74}$	$\frac{0.36}{0.19-0.45}$	$\frac{0.09}{0.04-0.18}$
Медь, мг/л	0.001	$\frac{1.5 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-4}-9 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{3.4 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-4}-8.6 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{4.2 \cdot 10^{-3}}{1.2 \cdot 10^{-3}-9.7 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{3.5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}-6 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{3 \cdot 10^{-3}}{0-5.4 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{0.003}{0.002-0.004}$	$\frac{0.002}{0.002-0.003}$	$\frac{0.001}{0.00-0.001}$
Цинк, мг/л	0.01	$\frac{1.45 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-4}-9.3 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{2.6 \cdot 10^{-3}}{0-1.67 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{2 \cdot 10^{-3}}{0-1.3 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{9.4 \cdot 10^{-3}}{0-2.8 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{1.3 \cdot 10^{-2}}{0-3.1 \cdot 10^{-1}}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.01}{0.01-0.02}$	$\frac{0.001}{0.00-0.002}$
Никель, мг/л	0.01	$\frac{7.6 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}-3.4 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{2 \cdot 10^{-4}}{0-9 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{3 \cdot 10^{-3}}{0-2.9 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{2 \cdot 10^{-3}}{0-4.6 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{2.4 \cdot 10^{-3}}{0-7.2 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$
Марганец, Мп ²⁺ , мг/л	0.01	$\frac{0.19}{0.08-0.27}$	$\frac{0.062}{0.006-0.28}$	$\frac{0.033}{0.002-0.16}$	$\frac{0.03}{0.005-0.105}$	$\frac{0.09}{0.0087-0.33}$	нет данных	нет данных	нет данных
Хлориды, мг/л	300	$\frac{6.23}{2.8-12.8}$	$\frac{8.26}{4.4-13.3}$	$\frac{8.63}{4.2-17.5}$	$\frac{6.94}{1.36-10.8}$	$\frac{9.73}{0.11-24.5}$	$\frac{37.87}{9.79-65.60}$	$\frac{48.26}{27.53-59.06}$	$\frac{49.89}{14.11-74.07}$
Сульфаты, мг/л	100	$\frac{30.0}{8.24-43.46}$	$\frac{24}{16.2-35.9}$	$\frac{21.73}{17.79-30.13}$	$\frac{17.72}{12.47-22.02}$	$\frac{39.12}{11.07-54.84}$	$\frac{42.31}{9.81-118.66}$	$\frac{37.88}{25.21-48.17}$	$\frac{81.31}{10.51-132.11}$

Примечание: над чертой — среднегодовые значения показателей, под чертой — минимальный и максимальный значения за год среднесуточные значения показателей.

Таблица 5. Характерные концентрации загрязняющих веществ и значения гидрокимических показателей в водохранилищах для среднего по водности года (для водохранилищ Верхневолжского каскада 2018 г., для Камского каскада 2014 г.)

Показатель	ПДК, мг/л	Иваньковское	Угличское	Рыбинское	Горьковское	Чебоксарское	Камское	Воткинское	Нижнекамское
Число измерений N		44	68	100	268	136	48	88	184
Взвешенные вещества, мг/л	нет	8.86 3.99–17.7	4.52 1.06–7.42	1.71 0.72–2.88	2.43 0.63–4.48	5.42 1–10.09	7.52 4.83–11.66	11.85 5.81–25.93	8.15 4.58–18.07
Растворенный кислород, мг/л	4	8.35 5.76–10.67	8.34 5.92–10.15	9.31 8.13–10.31	9.09 8.15–9.98	7.99 7.07–8.86	9.01 7.79–10.35	9.12 8.33–10.02	8.43 7.25–9.95
БПК ₅ , мг/л	2.1	2.56 0.7–5.7	2.46 1.3–5.2	2.31 1.55–3.97	2.43 1.87–3.6	2.03 0.4–4.7	0.89 0.59–1.53	0.83 0.55–1.81	2.02 1.20–2.46
ХПК, мг/л	15	28.57 10–56.7	32.3 18–48	34.176 22.7–62.7	37.96 30.5–54	34.34 2.1–57	27.63 15.15–37.93	24.36 17.12–30.18	24.70 15.52–30.34
Фенолы, мг/л	0.001	2·10 ⁻³ 5·10 ⁻⁴ –6·10 ⁻³	1.6·10 ⁻³ 5·10 ⁻⁴ –4.4·10 ⁻³	5·10 ⁻⁴ 5·10 ⁻⁴	3·10 ⁻⁵ 0–2.3·10 ⁻⁴	4.98·10 ⁻⁵ 0–1·10 ⁻³	0.002 0.002–0.003	0.002 0.002–0.003	0.001 0.0–0.003
Нефтепродукты, мг/л	0.05	0.05 0.04–0.09	0.04 0.02–0.09	0.02 0.01–0.02	0.02 0.01–0.03	0.02 0.01–0.03	0.04 0.04–0.07	0.05 0.04–0.06	0.06 0.05–0.12
Нитриты, мг/л	0.08	0.077 0.02–1.2	0.04 0.02–0.41	0.044 0.021–0.55	0.031 0.012–0.075	0.05 0–0.39	0.02 0.01–0.023	0.02 0.01–0.03	0.02 0.02–0.04
Нитраты, мг/л	40	1.8 0.1–4	1.97 0.05–5	1.74 0.16–3.64	1.494 0.66–2.422	2.37 0–7.29	0.79 0.23–1.39	1.23 0.65–2.36	1.71 0.79–2.59
Аммоний-ион, мг/л	0.5	0.47 0.18–0.79	0.49 0.31–0.67	0.52 0.31–0.9	0.33 0.19–0.66	нет данных	0.46 0.16–0.97	0.38 0.20–0.55	0.29 0.20–0.41
Железо общее, мг/л	0.1	0.18 0.05–0.43	0.50 0.08–0.90	0.71 0.53–0.97	0.65 0.44–1.05	0.5 0.27–0.75	0.35 0.13–0.70	0.30 0.15–0.42	0.13 0.04–0.36
Медь, мг/л	0.001	5.8·10 ⁻⁴ 1·10 ⁻⁴ –9.8·10 ⁻⁴	4·10 ⁻³ 1·10 ⁻⁴ –1.51·10 ⁻²	4.4·10 ⁻³ 1.4·10 ⁻³ –1.23·10 ⁻²	5.9·10 ⁻³ 3·10 ⁻³ –1·10 ⁻²	3.4·10 ⁻³ 0–1.6·10 ⁻²	0.003 0.002–0.004	0.003 0.002–0.004	0.01 0.00–0.005
Цинк, мг/л	0.01	1·10 ⁻³ 1·10 ⁻⁴ –3.2·10 ⁻³	4·10 ⁻³ 5·10 ⁻⁴ –1.1·10 ⁻²	5·10 ⁻³ 0–8.2·10 ⁻³	1.2·10 ⁻² <5·10 ⁻³ –3.9·10 ⁻²	2·10 ⁻² 0–1.1·10 ⁻¹	0.01 0.01–0.01	0.01 0.01–0.01	0.001 0.00–0.003
Никель, мг/л	0.01	7.2·10 ⁻⁴ 2·10 ⁻⁴ –3.6·10 ⁻³	4.9·10 ⁻⁴ 2·10 ⁻⁴ –1.1·10 ⁻³	<5·10 ⁻³	1·10 ⁻³ <5·10 ⁻³ –3·10 ⁻³	2.3·10 ⁻³ 0–1.4·10 ⁻²	0.01 7.79–0.01	0.01 0.01–0.01	0.01 0.01–0.01
Марганец, Мп ²⁺ , мг/л	0.01	0.14 0.06–0.3	0.151 0.033–0.583	0.095 0.013–0.454	0.071 0.021–0.161	0.087 0–0.201	нет данных	нет данных	нет данных
Хлориды, мг/л	300	8.81 5.8–12.9	10.66 8.1–17	<10 <10–17.77	5.785 2.31–11.6	12.18 2.17–28	38.59 10.84–62.08	37.88 20.91–45.59	52.67 13.11–87.70
Сульфаты, мг/л	100	20.98 16.31–26.3	23.3 15.7–30.4	22.62 15.61–29	17.8 13.46–24.21	37.83 22.85–53.59	42.95 13.90–113.42	38.46 26.72–50.37	57.19 13.38–96.17

Примечание: над чертой — среднегодовые значения показателей, под чертой — минимальный и максимальные за год среднемесячные значения показателей.

Таблица 6. Характерные концентрации загрязняющих веществ и значения гидрхимических показателей в водохранилищах для маловодного года (для водохранилищ Верхневолжского каскада 2016 г., для Камского каскада 2021 г.)

Показатель	ПДК, мг/л	Иваньковское	Угличское	Рыбинское	Горьковское	Чебоксарское	Камское	Воткинское	Нижнекамское
Число измерений N		44	68	100	275	197	48	88	184
Взвешенные вещества, мг/л	нет	$\frac{3.93}{3-6.28}$	$\frac{3.99}{2.14-7.0}$	$\frac{1.25}{0.5-2.67}$	$\frac{2.20}{0.5-5.42}$	$\frac{6.01}{2.9-12.76}$	$\frac{10.66}{6.56-15.43}$	$\frac{10.38}{7.15-21.46}$	$\frac{5.16}{3.62-7.80}$
Растворенный кислород, мг/л	4	$\frac{8.2}{5.2-10.35}$	$\frac{9.22}{7.4-11.15}$	$\frac{8.64}{7.54-9.88}$	$\frac{9.15}{6.68-10.09}$	$\frac{8.46}{7.6-9.33}$	$\frac{9.16}{7.92-10.46}$	$\frac{8.48}{7.43-11.66}$	$\frac{8.68}{6.28-10.84}$
БПК ₅ , мг/л	2.1	$\frac{2.2}{1-6.8}$	$\frac{1.8}{0.9-3.2}$	$\frac{2.02}{1.05-3.93}$	$\frac{1.81}{0.98-3.52}$	$\frac{1.76}{0.5-4.8}$	$\frac{1.61}{0.81-2.27}$	$\frac{1.26}{0.84-2.24}$	$\frac{3.03}{2.23-3.91}$
ХПК, мг/л	15	$\frac{36.37}{20-56}$	$\frac{37.3}{23.2-64}$	$\frac{38.19}{19.9-59.1}$	$\frac{32.15}{14.6-57.8}$	$\frac{29.97}{4.48-51.2}$	$\frac{25.67}{13.82-37.30}$	$\frac{27.78}{19.14-41.04}$	$\frac{23.35}{16.94-29.96}$
Фенолы, мг/л	0.001	$\frac{5.6 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-4}-1 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{6.7 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-4}-1.2 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{5.6 \cdot 10^{-4}}{5.6 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{1 \cdot 10^{-4}}{<5 \cdot 10^{-3}-9.7 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{2 \cdot 10^{-4}}{0-1 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0.003}{0.002-0.004}$	$\frac{0.002}{0.002-0.003}$	$\frac{0.002}{0.0-0.004}$
Нефтепродукты, мг/л	0.05	$\frac{0.07}{0.04-0.1}$	$\frac{0.06}{0.02-0.12}$	$\frac{0.03}{0.01-0.08}$	$\frac{0.02}{0.01-0.04}$	$\frac{0.03}{0.02-0.05}$	$\frac{0.05}{0.04-0.06}$	$\frac{0.05}{0.04-0.08}$	$\frac{0.03}{0.02-0.05}$
Нитриты, мг/л	0.08	$\frac{0.032}{0.02-0.07}$	$\frac{0.05}{0.02-0.66}$	$\frac{0.061}{0.025-0.108}$	$\frac{0.044}{0.025-0.101}$	$\frac{0.099}{0-1.46}$	$\frac{нет}{данных}$	$\frac{нет}{данных}$	$\frac{0.02}{0.02-0.04}$
Нитраты, мг/л	40	$\frac{1.87}{0.5-4}$	$\frac{1.68}{0.29-4.7}$	$\frac{1.24}{0.11-4.05}$	$\frac{1.074}{0.221-2.22}$	$\frac{2.33}{0-12.4}$	$\frac{0.89}{0.40-1.64}$	$\frac{0.94}{0.61-1.38}$	$\frac{2.60}{0.66-4.41}$
Аммоний-ион, мг/л	0.5	$\frac{0.4}{0.1-0.73}$	$\frac{0.33}{0.05-0.63}$	$\frac{0.47}{0.24-1.09}$	$\frac{0.28}{0-0.5}$	$\frac{нет}{данных}$	$\frac{0.18}{0.02-0.27}$	$\frac{0.11}{0.02-0.22}$	$\frac{0.32}{0.23-0.49}$
Железо общее, мг/л	0.1	$\frac{0.31}{0.11-0.92}$	$\frac{0.32}{0.10-0.65}$	$\frac{0.48}{0.31-0.75}$	$\frac{0.39}{0.12-0.71}$	$\frac{0.36}{0.21-0.52}$	$\frac{0.26}{0.13-0.52}$	$\frac{0.17}{0.10-0.22}$	$\frac{0.06}{0.02-0.12}$
Медь, мг/л	0.001	$\frac{1 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-4}-1 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{5.1 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-4}-2.81 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{6.7 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10^{-4}-1.72 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{7.1 \cdot 10^{-3}}{1.8 \cdot 10^{-3}-1.5 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{3.2 \cdot 10^{-3}}{0-8.1 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{0.003}{0.002-0.004}$	$\frac{0.004}{0.003-0.005}$	$\frac{0.001}{0.00-0.001}$
Цинк, мг/л	0.01	$\frac{2.9 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 10^{-4}-1.7 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{1.8 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-4}-8.1 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{<0.005}{<0.005}$	$\frac{9.1 \cdot 10^{-3}}{<0.005-5.3 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{2 \cdot 10^{-2}}{0-1 \cdot 10^{-1}}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.001}{0.00-0.001}$
Никель, мг/л	0.01	$\frac{4.2 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}-1 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{8 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 10^{-4}-1.8 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{<0.005}{<0.005}$	$\frac{1 \cdot 10^{-3}}{<0.005-8 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{1.5 \cdot 10^{-3}}{0-3.3 \cdot 10^{-2}}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$	$\frac{0.01}{0.01-0.01}$
Марганец, Mn ²⁺ , мг/л	0.01	$\frac{0.164}{0.08-0.28}$	$\frac{0.084}{0.009-0.23}$	$\frac{0.058}{0.008-0.192}$	$\frac{0.049}{0.018-0.154}$	$\frac{0.075}{0.005-0.19}$	$\frac{нет}{данных}$	$\frac{нет}{данных}$	$\frac{нет}{данных}$
Хлориды, мг/л	300	$\frac{8.06}{5.6-12.5}$	$\frac{10.01}{5.9-14}$	$\frac{<10}{<10-11.06}$	$\frac{7.91}{1.94-11.8}$	$\frac{11.97}{1.68-32}$	$\frac{45.66}{12.18-75.35}$	$\frac{46.95}{30.82-62.87}$	$\frac{42.44}{10.26-57.73}$
Сульфаты, мг/л	100	$\frac{20.77}{14.96-42.6}$	$\frac{25.35}{16.6-35.6}$	$\frac{30.53}{24.71-35.1}$	$\frac{28.22}{16.03-38.78}$	$\frac{42.54}{5.98-62.08}$	$\frac{48.44}{12.94-122.91}$	$\frac{46.92}{35.33-64.29}$	$\frac{72.15}{10.75-142.78}$

Примечание: над чертой — среднегодовые значения показателей, под чертой — минимальный и максимальные значения за год среднеемесячные значения показателя.

Таблица 7. Качество воды водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов по ИЗВ в разные по водности годы

Показатель, использованный в расчетах ИЗВ	Год	Водность года	ИЗВ	Класс качества воды	Характеристика состояния загрязненности воды
Иваньковское водохранилище					
БПК ₅	2012	многоводный	4.45	V	Грязная
Железо общее	2016	маловодный	4.15	V	Грязная
Марганец	2018	средний	3.32	IV	Загрязненная
Нефтепродукты					
Растворенный кислород					
ХПК					
Угличское водохранилище					
БПК ₅	2012	многоводный	3.05	IV	Загрязненная
Железо общее	2016	маловодный	3.39	IV	Загрязненная
Марганец	2018	средний	4.96	V	Грязная
Медь					
Растворенный кислород					
ХПК					
Рыбинское водохранилище					
БПК ₅	2012	многоводный	3.09	IV	Загрязненная
Железо общее	2016	маловодный	3.50	IV	Загрязненная
Марганец	2018	средний	3.80	IV	Загрязненная
Медь					
Растворенный кислород					
ХПК					
Горьковское водохранилище					
БПК ₅	2012	многоводный	2.60	IV	Загрязненная
Железо общее	2016	маловодный	3.22	IV	Загрязненная
Марганец	2018	средний	3.92	IV	Загрязненная
Медь					
Растворенный кислород					
ХПК					
Чебоксарское водохранилище					
БПК ₅	2012	многоводный	3.14	IV	Загрязненная
Железо общее	2016	маловодный	2.94	IV	Загрязненная
Марганец	2018	средний	3.47	IV	Загрязненная
Медь					
Растворенный кислород					
ХПК					
Камское водохранилище					
БПК ₅	2019	многоводный	2.09	III	Умеренно загрязненная
Железо общее	2021	маловодный	1.82	III	Умеренно загрязненная
Медь	2014	средний	2.12	III	Умеренно загрязненная
Растворенный кислород					
Фенолы					
ХПК					
Воткинское водохранилище					
БПК ₅	2019	многоводный	2.05	III	Умеренно загрязненная
Железо общее	2021	маловодный	1.78	III	Умеренно загрязненная
Медь	2014	средний	1.79	III	Умеренно загрязненная
Растворенный кислород					
Фенолы					
ХПК					
Нижнекамское водохранилище					
БПК ₅	2019	многоводный	1.13	III	Умеренно загрязненная
Железо общее	2021	маловодный	1.15	III	Умеренно загрязненная
Медь	2014	средний	1.13	III	Умеренно загрязненная
Растворенный кислород					
Фенолы					
ХПК					

Однако кроме марганца содержание прочих перечисленных показателей не превышало 7 ПДК (для железа и меди), а в основном составляло 1–2 ПДК.

В водохранилищах Камского каскада во все годы были превышены железо общее, медь, ХПК, нефтепродукты. Иногда отмечались превышения содержания аммонийного азота, БПК₅ и единично (2014 г., Камское водохранилище) цинка. При этом загрязнение Камского водохранилища во все годы, а Воткинского в 2014 г. фенолами достигало 20 ПДК, содержание меди превышало 20 ПДК, ХПК — более 14 ПДК, а содержание железа общего в средние и многоводные годы превышало 30 ПДК. Для других водохранилищ Камской ветви и остальных ингредиентов содержание загрязняющих веществ практически не превышало 2 ПДК.

В табл. 8 приведен перечень загрязняющих веществ, среднемесячные концентрации которых наиболее часто превышают ПДК и соответственно формируют характерное для водохранилищ загрязнение воды в течение года. Данные приведены для наиболее представительных, средних по водности лет: для 2018 г. — для Верхневолжских водохранилищ и 2014 г. — для водохранилищ Камского каскада. В воде Верхневолжских водохранилищ всегда (в 100% случаев) присутствует марганец и всегда превышен ХПК. В воде Чебоксарского водохранилища всегда есть превышение цинка. В Рыбинском и Горьковском водохранилищах всегда фиксируется превышение железа общего и меди. В водохранилищах Камского каскада в 100% случаев превышен ХПК. В Камском и Воткинском водохранилищах всегда отмечается превышение содержания меди и фенолов, а в Камском еще и общего железа.

По УКИЗВ худшее качество воды отмечено для Верхневолжских водохранилищ (табл. 9). Почти во все исследовавшиеся годы вода характеризуется как “очень загрязненная”. Для водохранилищ Камского каскада значения УКИЗВ ниже. Вода относится к категории “загрязненная”, а для Нижнекамского — в основном к категории “слабозагрязненная”. Однако для Камских водохранилищ не было информации о содержании марганца. А именно этот элемент был единственным из всех измерявшихся, кто попал в категорию критических показателей загрязнения для Верхневолжской ветви.

Обе оценки, и ИЗВ, и УКИЗВ, показывают несколько больший уровень загрязнения Верхневолжских водохранилищ по сравнению с Камскими, что, однако, может быть связано с отсутствием данных о содержании марганца в водах Камского каскада. По обоим показателям наилучшее качество воды характерно для Нижнекамского водохранилища.

Зависимость качества воды Верхневолжских и Камских водохранилищ от водности года

Получены незначимые по t -критерию Стьюдента (даже при $p = 0.05$) коэффициенты корреляции между среднегодовыми значениями УКИЗВ и притока воды к водохранилищу (водностью года) для водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов, что свидетельствует об отсутствии связи между качеством воды и водностью года. Но если для Волжских водохранилищ коэффициент корреляции близок к нулю, то для Камских водохранилищ абсолютные значения коэффициента корреляция между этими показателями выше. Для Камского каскада прослеживается тенденция: качество воды улучшается (УКИЗВ уменьшается) при росте водности года. Однако для проверки гипотезы о значимости выявленной тенденции Камских водохранилищ необходимо увеличение числа анализируемых лет.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные оценки качества воды по УКИЗВ близки к оценкам Росгидромета (Качество ..., 2013, 2015, 2017, 2019, 2020, 2022) для соответствующих лет (табл. 10). Разница может быть связана как с разными местами отбора проб в разных лабораториях, так и, возможно, с отличиями в применявшихся методиках отбора и анализа проб. Кроме того, если в лабораториях Росгидромета оценивается УКИЗВ для точек наблюдений, то в данной работе подсчитаны УКИЗВ для предварительно осредненных для водохранилищ показателей, что сглаживает оценки. Однако оба массива данных, и Росгидромета и Росводресурсов, свидетельствуют об отсутствии связи качества воды водохранилищ Верхневолжского каскада с водностью лет. И в многоводные, и в маловодные годы качество воды в большинстве своем стабильно неудовлетворительное. Увеличение притока воды в многоводные годы статистически не сказывается на качестве воды в водохранилищах (хотя для камских водохранилищ и прослеживается тенденция улучшения качества вводы в многоводные годы). Можно достаточно уверенно говорить об отсутствии эффекта разбавления загрязненной воды Верхневолжских водохранилищ даже в годы повышенной водности. Причины такого явления могут быть следующими. С одной стороны, это увеличение поступления загрязняющих веществ с водосборов в годы повышенной водности от диффузных источников загрязнения. Диффузный сток в большинстве своем поступает в водные объекты без всякой, даже минимальной, очистки. Увеличение слоя водного стока приводит к росту неконтролируемого выноса веществ как с антропогенно преобразованных территорий (с сельскохозяйственных полей,

Таблица 8. Повторяемость случаев превышения ПДК в водохранилищах для среднего по водности года

Водохранилище	Год	Характеристика загрязнения воды (% случаев превышения ПДК)		
		Устойчивое (более 50%)	Характерное (от 30 до 50%, включая 30%, но исключая 50%)	Неустойчивое (от 10 до 30%, включая 10%, но исключая 30%)
Иваньковское	2018	Марганец ХПК БПК ₅ Фенолы	Аммоний-ион Железо общее	Нефтепродукты Растворенный кислород Нитриты
Угличское	2018	Марганец ХПК Железо общее БПК ₅ Медь Фенолы Аммоний-ион		Нефтепродукты Растворенный кислород
Рыбинское	2018	Железо общее Медь Марганец ХПК БПК ₅	Аммоний-ион	
Горьковское	2018	Железо общее Медь Марганец ХПК БПК ₅	Цинк	Аммоний-ион
Чебоксарское	2018	Железо общее Марганец ХПК Цинк Медь	БПК ₅	Нитриты
Камское	2014	Железо общее Медь Фенолы ХПК	Аммоний-ион Нефтепродукты Цинк	
Воткинское	2014	Медь Фенолы ХПК Железо общее Нефтепродукты	Аммоний-ион	
Нижнекамское	2014	ХПК Железо общее Нефтепродукты Медь Фенолы	БПК ₅	

с территорий населенных пунктов, с промышленных площадок), так и с естественных угодий. При этом функционирование и соответственно сбросы загрязняющих веществ от промышленных и коммунальных предприятий, основных поставщиков точечных контролируемых загрязнений, определяются производственными циклами, и в меньшей степени зависят от водности года. В маловодные годы возрастает доля

точечных источников поступления загрязняющих веществ в водные объекты. Одновременно с ростом водности года увеличивается как абсолютный, так и относительный вклад диффузных источников, а суммарный поток веществ от всех источников растет. Таким образом, рост водности сопровождается одновременным увеличением поступления загрязняющих веществ в водные объекты, что препятствует активизации

Таблица 9. Качество воды водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов по УКИЗВ в разные по водности годы

Год	Водность года	УКИЗВ	КПЗ (число/ показатели)	Класс и разряд без учета числа КПЗ	Характеристика состояния загрязненности воды без учета числа КПЗ	Класс и разряд с учетом числа КПЗ	Характеристика состояния загрязненности воды с учетом числа КПЗ
Иваньковское водохранилище							
2012	многоводный	3.37	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2016	маловодный	2.88	1/марганец	3а	загрязненная	3б	очень загрязненная
2018	средний	3.65	1/марганец	3б	очень загрязненная	4а	грязная
Угличское водохранилище							
2012	многоводный	3.27	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2016	маловодный	3.72	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2018	средний	4.16	1/марганец	4а	грязная	4а	грязная
Рыбинское водохранилище							
2012	многоводный	3.06	0	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2016	маловодный	3.24	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2018	средний	3.24	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
Горьковское водохранилище							
2012	многоводный	3.18	0	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2016	маловодный	3.03	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2018	средний	3.40	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
Чебоксарское водохранилище							
2012	многоводный	3.37	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2016	маловодный	3.49	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
2018	средний	3.36	1/марганец	3б	очень загрязненная	3б	очень загрязненная
Камское водохранилище							
2019	многоводный	2.59	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная
2021	маловодный	2.72	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная
2014	средний	2.71	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная
Воткинское водохранилище							
2019	многоводный	2.33	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная
2021	маловодный	2.86	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная
2014	средний	2.64	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная
Нижекамское водохранилище							
2019	многоводный	1.94	0	2	слабо загрязненная	2	слабо загрязненная
2021	маловодный	1.71	0	2	слабо загрязненная	2	слабо загрязненная
2014	средний	2.21	0	3а	загрязненная	3а	загрязненная

Примечание: КПЗ — критические показатели загрязненности воды (ингредиенты или показатели качества воды, которые обуславливают перевод воды по степени загрязненности в класс "очень грязная" на основании величины рассчитываемого по каждому ингредиенту оценочного балла, учитывающего одновременно величину наблюдаемых концентраций и частоту их обнаружения).

Таблица 10. Состояние качества воды водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов по данным лабораторий Росводресурсов и Росгидромета

Водохранилище	Водность года	Год	Состояние качества воды водохранилища по УКИЗВ			
			по данным Росводресурсов		по данным Росгидромета	
			Класс и разряд с учетом числа КПЗ	Характеристика состояния воды с учетом числа КПЗ	Класс и разряд	Характеристика состояния воды
Иваньковское	многоводный	2012	3б	очень загрязненная	3а–3б–4а	загрязненная — очень загрязненная — грязная
Иваньковское	маловодный	2016	3б	очень загрязненная	3а–3б	загрязненная — очень загрязненная
Иваньковское	средний	2018	4а	грязная	3а–3б	загрязненная — очень загрязненная
Угличское	многоводный	2012	3б	очень загрязненная	3а–3б–4а	загрязненная — очень загрязненная — грязная
Угличское	маловодный	2016	3б	очень загрязненная	3а–3б	загрязненная — очень загрязненная
Угличское	средний	2018	4а	грязная	3а–3б	загрязненная — очень загрязненная
Рыбинское	многоводный	2012	3б	очень загрязненная	3б–4а	очень загрязненная — грязная
Рыбинское	маловодный	2016	3б	очень загрязненная	3б–4а	очень загрязненная — грязная
Рыбинское	средний	2018	3б	очень загрязненная	3а–3б	загрязненная и очень загрязненная
Горьковское	многоводный	2012	3б	очень загрязненная	2–3а–3б–4а	слабозагрязненная — загрязненная — очень загрязненная — грязная
Горьковское	маловодный	2016	3б	очень загрязненная	3а–3б	загрязненная и очень загрязненная
Горьковское	средний	2018	3б	очень загрязненная	3а–3б	загрязненная и очень загрязненная
Чебоксарское	многоводный	2012	3б	очень загрязненная	3а–3б–4а	загрязненная — очень загрязненная — грязная
Чебоксарское	маловодный	2016	3б	очень загрязненная	3а–3б–4а	загрязненная, очень загрязненная — грязная
Чебоксарское	средний	2018	3б	очень загрязненная	3а–3б–4а	загрязненная — очень загрязненная — грязная
Камское	многоводный	2019	3а	загрязненная	3б–4а	очень загрязненная — грязная
Камское	маловодный	2021	3а	загрязненная	3а–3б	загрязненная — очень загрязненная
Камское	средний	2014	3а	загрязненная	3а–3б	загрязненная — очень загрязненная
Воткинское	многоводный	2019	3а	загрязненная	3а–3б	загрязненная — очень загрязненная
Воткинское	маловодный	2021	3а	загрязненная	3б	очень загрязненная
Воткинское	средний	2014	3а	загрязненная	3б	очень загрязненная
Нижнекамское	многоводный	2019	2	слабо загрязненная	3а–3б	загрязненная — очень загрязненная
Нижнекамское	маловодный	2021	2	слабо загрязненная	3а–3б	загрязненная — очень загрязненная
Нижнекамское	средний	2014	3а	загрязненная	3б	очень загрязненная

ции процессов разбавления. С другой стороны, как представляется, значительную роль в сохранении квазистационарного состояния водохранилища могут играть внутриводоемные процессы обмена и трансформации вещества в толще воды и на границах между водой и донными отложениями, между атмосферой и водной толщей. За счет этих факторов (увеличение роста диффузного стока в годы повышенной водности и внутриводоемные процессы), вода водохранилищ каскадов поддерживается в стабильно неудовлетворительном состоянии. Ожидать улучшения качества воды в водохранилищах за счет климатических (природных) флуктуаций водности и фактора разбавления на современном этапе уже нельзя. Решение проблемы — в совершенствовании системы управления водными ресурсами: в модернизации и строительстве современных систем очистки сточных вод промышленных и сельскохозяйственных предприятий, в реализации мероприятий на водосборах по предотвращению и сокращению диффузного стока.

ВЫВОДЫ

1. В водах всех водохранилищ во все исследуемые годы выявлена повышенная комплексность загрязненности: от 20 до 40% контролируемых показателей превышают ПДК. Комплексность выше в водах Верхневолжских водохранилищ, ниже — в Камских.

2. Для каждого из водохранилищ Верхневолжского и Камского каскадов выявлены приоритетные для контроля вещества, содержание которых в наибольшей степени превышают ПДК и соответственно дают наибольший вклад в ухудшение качества воды исследованных водохранилищ. Марганец, общее железо, медь (за исключением Ивановского водохранилища) в наибольшей степени превышают ПДК и являются главными загрязняющими веществами Верхневолжских водохранилищ. В несколько раз повышено также содержание фенолов, БПК₅ и ХПК. Для водохранилищ Камского каскада плохое качество воды обусловлено высокими содержаниями общего железа, меди, фенолов и в меньшей степени нефтепродуктов.

3. Во всех водохранилищах в 100% проб отмечается превышение ХПК, то есть большое количество трудноокисляемой органики. В воде Верхневолжских водохранилищ всегда (в 100% случаев) присутствует марганец. Отсутствие измерений марганца в базе данных по Камским водохранилищам не позволяет судить о распространенности этого элемента в воде Камской ветви каскада. Во всех рассмотренных водохранилищах устойчивое загрязнение (в более 50% случаев) отмечается для общего железа и меди (для меди — за исключением Ивановского

водохранилища). В камских водохранилищах и в двух верхних водохранилищах Верхневолжского каскада — Ивановском и Угличском отмечается устойчивая загрязненность фенолами. Для всех водохранилищ Верхневолжского каскада, за исключением Чебоксарского, устойчиво и загрязнение легкоокисляемым органическим веществом (по БПК₅). В воде Чебоксарского водохранилища характерное загрязняющее вещество — цинк, в Угличском — аммоний, а в Воткинском и Нижнекамском — нефтепродукты.

4. Применение методики расчета УКИЗВ и ИЗВ показало, что водохранилища Верхневолжского и Камского каскадов, несмотря на различия в их природных особенностях и видах антропогенной нагрузки на их водосборах, характеризуются неудовлетворительным состоянием даже при среднегодовом осреднении показателей. Ни в одном водохранилище качество воды не соответствовало рыбохозяйственным нормативам. По категории УКИЗВ качество воды Камских водохранилищ соответствует категории “загрязненное”, а водохранилищ Верхневолжского каскада — “очень загрязненное”, а в Ивановском и в Угличском водохранилищах оно в отдельные годы оценивается как “грязное”. По категории ИЗВ картина аналогичная. Камские водохранилища несколько чище, их вода характеризуется как “умеренно загрязненная”. Вода Верхневолжских водохранилищ “загрязненная”, а в Ивановском и Угличском — в ряде случаев “грязная”. И по УКИЗВ, и по ИЗВ лучшее из рассматриваемых водохранилищ качество воды в обоих каскадах выявлено в Нижнекамском водохранилище. Однако вывод о лучшем качестве воды Камских водохранилищ ограничен из-за отсутствия данных измерений марганца — единственного выявленного при расчетах УКИЗВ критического показателя загрязненности воды Верхневолжских водохранилищ. Скорее всего, в большинстве случаев марганец — региональное фоновое загрязняющее вещество (как и общее железо и медь), имеющее природное происхождение (Данилов-Данильян и др., 2020; Фащевская и др., 2023).

5. Сопоставление результатов оценки качества воды, выполненное по массивам данных Росводресурсов и Росгидромета, продемонстрировало достаточно близкое совпадение выполненных оценок качества воды для лет разной водности.

6. И в многоводные, и в маловодные годы качество воды водохранилищ в большинстве своем стабильно неудовлетворительное. Возможно, это состояние может считаться стационарным при существующих климатических условиях. Для Верхневолжских водохранилищ достоверно не выявлен ожидаемый эффект улучшения качества воды за счет большего разбавления в многоводные годы. Возможная причина этого

явления — рост диффузного поступления загрязняющих веществ при увеличении водности года, что препятствует процессам разбавления. В этой ситуации единственная возможность улучшения качества воды в водохранилищах — водоохранные мероприятия, способствующие сокращению поступления загрязняющих веществ с водосборов и непосредственно в водные объекты. К ним относятся строительство и модернизация до современных стандартов очистных сооружений на точечных источниках сбросов, а также перестройка системы водоохранных мероприятий на водосборах для предотвращения поступления диффузного загрязнения в водные объекты.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках гранта РНФ 22-17-00224 “Формирование гидролого-геохимических процессов на водосборах каскадов Верхне-Волжских и Камских водохранилищ при различных сценариях землепользования и изменениях климата на их территориях”.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем большую благодарность руководителям Верхневолжского и Камского бассейновых водных управлений Росводресурсов РФ А.Н. Баринову и А. В Михайлову и сотрудникам этих организаций за предоставленные материалы.

FUNDING

The work was carried out within the framework of the implementation and financial support of the Russian Science Foundation grant no. 22-17-00224 “Formation of hydrological and geochemical processes in the catchment areas of the cascades of the Upper Volga and Kama reservoirs under various land use scenarios and climate changes in their territories.”

ACKNOWLEDGMENTS

We express our deep gratitude to the heads of the Upper Volga and Kama Basin Water Administrations of the Russian Federal Water Resources Agency A.N. Barinov and A.V. Mikhailov and the employees of these organizations for the materials provided.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Антропогенные воздействия на водные ресурсы России и сопредельных государств в конце XX столетия / отв. ред. Н.И. Коронкевич, И.С. Зайцева. М.: Наука, 2003. 367 с.
- Болгов М.В., Кочерян А.Г., Лебедева И.П., Шашков С.Н. Качество природных вод в каскаде волжских водохранилищ // Аридные экосистемы. 2008. Т. 14. № 35–36. С. 68–82.
- Буторин Н.В., Зиминова Н.А., Курдин В.П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л.: Наука, 1975. 158 с.
- Водоохранилища Верхней Волги. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 291 с.
- Водоохранилища и их воздействие на окружающую среду. М.: Наука, 1986. 367 с.
- Временные методические указания, по комплексной оценке, качества поверхностных и морских вод. М.: Госкомгидромет СССР, 1986. 5 с.
- Вуглинский В.Г. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 223 с.
- Данилов-Данильян В.И., Веницианов Е.В., Аджиенко Г.В., Козлова М.А. Оценка современных подходов к управлению качеством поверхностных вод и их охране // Вестн. РАН. 2019. Т. 89. № 12. С. 1248–1259.
<https://doi.org/10.31857/s0869-587389121248-1259>
- Данилов-Данильян В.И., Полянин В.О., Фашевская Т.Б., Кирпичникова Н.В., Козлова М.А., Веницианов Е.В. Проблема снижения диффузного загрязнения водных объектов и повышение эффективности водоохранных программ // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 5. С. 503–514.
<https://doi.org/10.31857/s0321059620050053>
- Дебольский В.К., Григорьева И.Л., Комиссаров А.Б., Корчагина Я.П., Хрусталева Л.И., Чекмарева Е.А. Современная гидрохимическая характеристика реки Волга и ее водохранилищ // Вода: Химия и Экология. 2010. № 11. С. 2–12.
- Демин А.П. Водопотребление и водоотведение в бассейне реки Волги, их влияние на качество воды // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 6. С. 847–861.
<https://doi.org/10.31857/s2587556623060055>
- Диффузное загрязнение водных объектов: проблемы и решения: кол. монография под рук. В.И. Данилова-Данильяна. М.: РАН, 2020. 512 с.
- Зиминова Н.А., Законнов В.В. Аккумуляция биогенных элементов в донных отложениях водохранилищ Верхней Волги // Тр. ИБВВ. 1982. № 50 (53). С. 62–67.
- Иваницкий О.М., Кузьмич В.Н., Янин Е.П. Природные геохимические особенности территорий и проблемы нормирования качества поверхностных вод / Биохимические инновации в условиях коррекции техногенеза биосферы: Тр. Международ. биогеохимич. Симпозиума, посвященного 125-летию со дня рождения академика А.П. Виноградова и 90-летию образования Приднестровского университета. Тирасполь: Приднестровский гос. ун-т им. Т.Г. Шевченко, 2020. Т. 2. С. 183–187.
- Иваньковское водохранилище и его жизнь // Тр. ИБВВ. Л.: Наука, 1978. № 34 (37). 304 с.
- Измайлова А.В., Дубровская К.А., Фуксова Т.В. Многолетние изменения основных составляющих водного баланса крупнейших водохранилищ Европейской территории России // Вопросы ге-

- ографии. Сб. 157. Водные проблемы и их решение / ред. В.М. Котляков и др. М.: Медиа-ПРЕСС, 2023. С. 191–213.
- Калинин В.Г., Шайдулина А.А., Фасахов М.А., Микова К.Д., Ясинский С.В., Скороход А.С.* Особенности формирования водного режима водохранилищ Камского каскада // Вестн. Воронеж. ун-та. 2025. № 2 (в печати).
- Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегод. 2012 / отв. ред. А.М. Никаноров. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ “Гидрохимический Институт”, 2013. 555 с.
- Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегод. 2014. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ “Гидрохимический Институт”, 2015. 530 с.
- Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегод. 2016. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ “Гидрохимический Институт”, 2017. 556 с.
- Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегод. 2018. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ “Гидрохимический Институт”, 2019. 561 с.
- Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегод. 2019 / отв. ред. М.М. Трофимчук. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ “Гидрохимический Институт”, 2020. 578 с.
- Качество поверхностных вод Российской Федерации: Ежегод. 2021 / отв. ред. М.М. Трофимчук. Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ “Гидрохимический Институт”, 2022. 620 с.
- Лукьянов К.В., Коронкевич Н.И.* Особенности распределения сточных и возвратных вод на территории Европейской части России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 5. С. 763–778.
<https://doi.org/10.31857/s2587556622050077>
- Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод суши по гидрохимическим показателям. РД 52.24.643–2002. СПб.: Гидрометеоздат, 2003. 49 с.
- Рисник Д.В., Беляев С.Д., Булгаков Н.Г., Левич А.П., Максимов В.Н., Мамихин С.В., Милько Е.С., Фурсова П.В., Ростовцева Е.Л.* Подходы к нормированию качества окружающей среды, законодательные и научные основы существующих систем экологического нормирования // Успехи современной биологии. 2012. Т. 132. № 6. С. 531–550.
- Романенко В.И.* Первичная продукция органического вещества в процессе фотосинтеза в каскаде волжских водохранилищ / Биологическая продуктивность и качество воды Волги и ее водохранилищ. М.: Наука, 1984. С. 48–60.
- Соболь С.В.* Водоохранилища в окружающей среде. В двух книгах. Н. Новгород: ННГАСУ, 2022. Кн. 1. 388 с.
- Тимофеева Л.А., Фрумин Г.Т.* Проблемы нормирования качества поверхностных вод // Уч. записки Рос. гос. гидрометеорологич. ун-та. 2015. № 38. С. 215–229.
- Томилина И.И., Гапеева М.В., Ложкина Р.А.* Оценка качества воды и донных отложений каскада водохранилищ реки Волга по показателям токсичности и химического состава // Тр. ИБВВ. 2018. № 82 (85). С. 107–131.
<https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0015>
- Фащевская Т.Б., Мотовилов Ю.Г., Картунова К.В.* Моделирование генетических составляющих водного и химического стока тяжелых металлов в бассейне Нижнекамского водохранилища // Водные ресурсы. 2023. Т. 50. № 4. С. 492–508.
<https://doi.org/10.31857/s0321059623040077>
- Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.* Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.
- Эдельштейн К.К.* Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
- Ясинский С.В., Кашутина Е.А., Сидорова М.В.* Диффузное загрязнение водных объектов равнинных территорий: проблема оценки // Изв. РАН. Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 1. С. 115–130.
- Ясинский С.В., Нарыков А.Н., Кашутина Е.А., Сидорова М.В.* Применение космических снимков для оценки диффузного загрязнения бассейнов рек на примере притоков Чебоксарского водохранилища: матер. 17-й Всерос. открытой конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса” (Москва, 11–15 ноября 2019 г.). М.: Институт космических исследований РАН, 2019. 129 с.

Current State of Water Quality in the Reservoirs of the Upper Volga and Kama Cascades

S. V. Yasinsky^{a,*}, E. S. Grishantseva^{a, b}, A. M. Rasulova^a,
M. A. Fasahov^d, A. A. Shaydulina^d, and E. A. Kashutina^a

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geological, Moscow, Russia*

^c*Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

^d*Perm State University, Perm, Russia*

*e-mail: yasisergej@yandex.ru

The article is devoted to the assessment of the water quality of the Upper Volga and Kama cascades of the reservoirs of the Volga basin in different years in terms of water content in the modern period. The main factors influencing the formation of water quality in the reservoirs, which is significantly affected by the influx of pollutants from catchments from point and diffuse anthropogenic sources, are determined. The materials for the work were data from the state water management monitoring carried out by laboratories of organizations subordinate to the Upper Volga and Kama Basin Water Administrations of the Federal Water Resources Agency of the Russian Federation. When assessing the quality and ecological state of surface waters, as well as for a comparative analysis of the degree of pollution of water bodies, integral indices were used: the Water Pollution Index (WPI) and the Specific Combinatorial Water Pollution Index (SCWPI), calculated for years of different water content. The assessment of the water content of the years was determined by the empirical curves of the annual water inflow to the individual reservoirs. The analysis of the difference-integral curves of the annual inflow to the Upper Volga and Kama cascades of reservoirs showed their asynchrony since the beginning of the 21st century. For each of the reservoirs of the Upper Volga and Kama cascades, priority substances for control were identified that provide the greatest contribution to the deterioration of water quality. The application of the SCWPI and WPI calculation methodology showed that the reservoirs of the cascades are characterized by an unsatisfactory condition. In none of the reservoirs does the water quality meet the fishery standards. According to the SCWPI category, the water quality of the Kama reservoirs corresponds to the category of “polluted,” and that of the reservoirs of the Upper Volga cascade—“very polluted.” In some years, the water quality in the Ivankovskoye and Uglich reservoirs is assessed as “dirty.” According to the WPI category, the picture is similar. No effect of the inflow water content on the water quality in these water bodies was revealed. A comparison of the water quality assessment results, carried out using data sets from Rosvodresursy and Roshydromet, demonstrated a fairly close match.

Keywords: reservoirs, cascades, water quality, pollutants, integral indices, annual inflow, years of different water content, difference-integral curves

REFERENCES

- Antropogennyye vozdeystviya na vodnye resursy Rossii i so-predel'nykh gosudarstv v kontse 20 stoletiya* [Anthropogenic Impacts on Water Resources of Russia and Neighboring Countries at the End of the 20th Century]. Koronkevich N.I., Zaitseva I.S., Eds. Moscow: Nauka Publ., 2003. 367 p.
- Bolgov M.V., Kocheryan A.G., Lebedeva I.P., Shashkov S.N. Quality of natural waters in the cascade of Volga reservoirs. *Arid. Ekosis.*, 2008, vol. 14, no. 35–36, pp. 68–82. (In Russ.).
- Butorin N.V., Ziminova N.A., Kurdin V.P. *Donnye ot-lozheniya verkhnevolzhskikh vodokhranilishch* [Bottom Sediments of the Upper Volga Reservoirs]. Leningrad: Nauka Publ., 1975. 158 p.
- Danilov-Danilyan V.I., Polyaniin V.O., Fashchevskaya T.B., Kirpichnikova N.V., Kozlova M.A., Venitsianov E.V. The problem of reducing the diffuse pollution of water bodies and improving the efficiency of water protection programs. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, no. 5, pp. 691–701.
<https://doi.org/10.1134/s009780782005005X>
- Danilov-Danilyan V.I., Venitsianov E.V., Adzhienko G.V., Kozlova M.A. Assessing recent approaches to quality control and conservation of surface waters. *Her. Russ. Acad. Sci.*, 2019, vol. 89, no. 6, pp. 599–607.
<https://doi.org/10.1134/s1019331619060029>
- Debol'skii V.K., Grigor'eva I.L., Komissarov A.B., Korchagina Ya.P., Khrustaleva L.I., Chekmareva E.A. Modern hydrochemical characteristics of the Volga River and its reservoirs. *Voda: Khim. Ekol.*, 2010, no. 11, pp. 2–12. (In Russ.).
- Demin A.P. Water consumption and water disposal in the Volga River basin, their impact on water quality. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2023, vol. 87, no. 6, pp. 847–861. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/s2587556623060055>
- Diffuznoe zagryaznenie vodnykh ob'ektov: problemy i resheniya* [Diffuse Pollution of Water Bodies: Problems

- and Solutions]. Danilov-Danilyan V.I., Ed. Moscow: Izd-vo Akad. Nauk, 2020. 512 p.
- Edel'shtein K.K. *Vodokhranilishcha Rossii: ekologicheskie problemy, puti ikh resheniya* [Reservoirs of Russia: Environmental Problems, Ways to Solve Them]. Moscow: GEOS Publ., 1998. 277 p.
- Fashchevskaya T.B., Motovilov Yu.G., Kortunova K.V. Modeling the genetic components of the water and chemical runoff of heavy metals in the basin of the Nizhnekamskoe reservoir. *Water Resour.*, 2023, vol. 50, no. 4, pp. 583–599. <https://doi.org/10.1134/s0097807823040073>
- Ivanitskii O.M., Kuz'mich V. N., Yanin E.P. Natural geochemical features of territories and problems of standardization of surface water quality. In *Biokhimicheskie innovatsii v usloviyakh korrektsii tekhnogeneza biosfery: Tr. mezhdun. biogeokhim. simpoz. Tom 2* [Biochemical Innovations in the Conditions of Correction of Biosphere Technogenesis: Proc. of the Int. Biogeochemical Symp. Vol. 2]. Tiraspol: Pridnestr. Gos. Univ. im. T.G. Shevchenko, 2020, pp. 183–187. (In Russ.)
- Ivan'kovskoe vodokhranilishche i ego zhizn'. *Vyp. 34* [Ivan'kovskoye Reservoir and Its Life. Vol. 34]. Leningrad: Nauka Publ., 1978. 304 p.
- Izmailova A.V., Dubrovskaya K.A., Fuksova T.V. Long-term changes in the main components of the water balance of the largest reservoirs of the European territory of Russia. In *Voprosy geografii. Sb.157: Vodnye problemy i ikh reshenie* [Problems of Geography. Vol. 157: Water Problems and Their Solution]. Kotlyakov V.M., Ed. Moscow: Media-PRESS Publ., 2023, pp. 191–213. (In Russ.)
- Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik 2012* [Quality of Surface Waters of the Russian Federation. Yearbook 2012]. Nikanorov A.M., Ed. Rostov-on-Don: Rosgidromet, Gidrokhimicheskii Inst., 2013. 555 p.
- Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik 2014* [Quality of Surface Waters of the Russian Federation. Yearbook 2014]. Rostov-on-Don: Rosgidromet, Gidrokhimicheskii Inst., 2015. 530 p.
- Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik 2016* [Quality of Surface Waters of the Russian Federation. Yearbook 2016]. Rostov-on-Don: Rosgidromet, Gidrokhimicheskii Inst., 2017. 556 p.
- Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik 2018* [Quality of Surface Waters of the Russian Federation. Yearbook 2018]. Rostov-on-Don: Rosgidromet, Gidrokhimicheskii Inst., 2019. 561 p.
- Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik 2019* [Quality of Surface Waters of the Russian Federation. Yearbook 2019]. Trofimchuk M.M., Ed. Rostov-on-Don: Rosgidromet, Gidrokhimicheskii Inst., 2020. 578 p.
- Kachestvo poverkhnostnykh vod Rossiiskoi Federatsii. Ezhegodnik 2021* [Quality of Surface Waters of the Russian Federation. Yearbook 2021]. Trofimchuk M.M., Ed. Rostov-on-Don: Rosgidromet, Gidrokhimicheskii Inst., 2022. 620 p.
- Kalinin V.G., Shaidulina A.A., Fasakhov M.A., Miko-va K.D., Yasinskii S.V., Skorokhod A.S. Features of the formation of the water regime of the reservoirs of the Kama cascade. *Vestn. Voronezh. Univ.*, 2025, no. 2. (In Russ.)
- Luk'yanov K. V., Koronkevich N.I. Features of the distribution of waste and return waters in the territory of the European part of Russia. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2022, vol. 86, no. 5, pp. 763–778. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/s2587556622050077>
- Metodicheskie ukazaniya. Metod kompleksnoi otsenki stepeni zagryaznennosti poverkhnostnykh vod sushu po gidrokhimicheskim pokazatelyam RD 52.24.643–2002* [Guidelines. Method of Comprehensive Assessment of the Degree of Pollution of Surface Waters of Land Based on Hydrochemical Indicators. RD 52.24.643–2002]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat Publ., 2003. 49 p.
- Risnik D.V., Belyaev S.D., Bulgakov N.G., Levich A.P., Maksimov V.N., Mamikhin S.V., Mil'ko E. S., Fursova P.V., Rostovtseva E.L. Approaches to environmental quality regulation, legislative and scientific foundations of existing environmental regulation systems. *Uspekhi Sovrem. Biol.*, 2012, vol. 132, no. 6, pp. 531–550. (In Russ.)
- Romanenko V.I. Primary production of organic matter in the process of photosynthesis in the cascade of Volga reservoirs. In *Biologicheskaya produktivnost' i kachestvo vody Volgi i ee vodokhranilishch* [Biological Productivity and Water Quality of the Volga River and Its Reservoirs]. Moscow: Nauka Publ., 1984, pp. 48–60. (In Russ.)
- Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D. *Kolichestvennaya gidroekologiya: metody sistemnoi identifikatsii* [Quantitative Hydroecology: Methods of System Identification]. Tolyatti: IEVB RAN, 2023. 463 p.
- Sobol' S.V. *Vodokhranilishcha v okruzhayushchei srede. Tom 1* [Reservoirs in the Environment. Vol. 1]. N. Novgorod: NNGASU, 2022. 388 p.
- Timofeeva L.A., Frumin G.T. Problems of standardization of surface water quality. *Uchen. Zapis. Ross. Gos. Gidromet. Univ.*, 2015, no. 38, pp. 215–229. (In Russ.)
- Tomilina I.I., Gapeeva M.V., Lozhkina R.A. Assessment of the quality of water and bottom sediments of the Volga River reservoir cascade based on toxicity and chemical composition indicators. *Tr. IBVV*, 2018, no. 82, pp. 107–131. (In Russ.). <https://doi.org/10.24411/0320-3557-2018-1-0015>
- Vodokhranilishcha i ikh vozdeistvie na okruzhayushchuyu sredu* [Reservoirs and Their Environment Impact]. Moscow: Nauka Publ., 1986. 367 p.
- Vodokhranilishcha Verkhnei Volgi* [Reservoirs of the Upper Volga]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1975. 291 p.
- Vremennye metodicheskie ukazaniya, po kompleksnoi otsenke, kachestva poverkhnostnykh i morskikh vod* [Interim Guidelines for the Comprehensive Assessment of Surface and Marine Water Quality]. Moscow: Goskomgidromet SSSR, 1986. 5 p.

- Vuglinskii V.G. *Vodnye resursy i vodnyi balans krupnykh vodokhranilishch SSSR* [Water Resources and Water Balance of Large Reservoirs of the USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1991. 223 p.
- Yasinskii S.V., Kashutina E.A., Sidorova M.V. Diffuse pollution of water bodies in flat areas: the problem of assessment. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2023, vol. 87, no. 1, pp. 115–130. (In Russ.).
- Yasinskii S.V., Narykov A.N., Kashutina E.A., Sidorova M.V. Application of space images to assess diffuse pollution of river basins using the example of tributaries of the Cheboksary reservoir. In *Materialy 17-i Vseross. otkrytoi konf. "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"*, Moskva, 11–15 noyabrya 2019 goda [Proc. of the 17th All-Russian Open Conf. "Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space", Moscow, November 11–15, 2019]. Moscow: Inst. Kosmich. Issled. RAN, 2019. 129 p. (In Russ.).
- Ziminova N.A., Zakonnov V.V. Accumulation of biogenic elements in bottom sediments of Upper Volga reservoirs. *Tr. IBVV*, 1982, no. 50, pp. 62–67. (In Russ.).