

КОРРЕКЦИЯ УДЕЛЬНЫХ КОМБИНАТОРНЫХ ИНДЕКСОВ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ВОД С УЧЕТОМ ФОНОВОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

В статье представлена оценка качества воды и ее пространственной изменчивости на участках нижнего течения реки Камы, проведена сравнительная интерпретация полученных результатов с помощью удельного комбинаторного индекса загрязненности и вероятностных характеристик, рассмотрены проблемы, возникающие при оценке рядов гидрохимических данных. Указаны недостатки метода комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод и пути их решения. Отмечено, что в ситуациях, когда среднемноголетние значения гидрохимических показателей в исследуемом створе (водном объекте) превышают установленные ПДК, в качестве порога необходимо использовать их фоновые концентрации, рассчитываемые как медиана соответствующей выборки.

Ключевые слова: качество воды; индекс загрязненности; вероятностная оценка; мониторинг; река Кама.

DOI: <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.1.16.20>

Введение

Аналитическая оценка результатов гидрохимических исследований базируется на их сопоставлении с нормативами предельно допустимых концентраций и соответствующей интерпретацией полученных сравнительных характеристик. Даже однократное превышение ПДК загрязняющего вещества в воде является событием, требующим адекватной оценки и реагирования. В алгоритмах подобных оценок используются классические статистические исследования размахов концентраций и их вариационных рядов с определением степени «случайности» обнаруженного загрязнения и вероятностные методы, агрегирующие информацию о кратности и частоте отмеченных превышений.

При этом оценка рядов гидрохимических данных, применяемая в научных исследованиях, как правило, основывается на классических методах статистики, включающих расчет вариаций, дисперсий, статистических значимостей, корреляций и т.д. В системе государственного мониторинга методы оценки загрязненности оперируют такими характеристиками как кратность и частота превышений нормативных значений.

Подобные различия в подходах к оцениванию обусловлены тем, что в рамках научных исследований важна характеристика динамики и взаимосвязей разных показателей, изменчивости их вариационных рядов и многомерное шкалирование разнообразных признаков, которые практически не используются в системах принятия решений.

Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям (РД 52.24.643–2002) имеет ряд недостатков, наиболее существенным из которых является чувствительность величины удельного комбинаторного индекса загрязненности (УКИЗВ) к перечню оцениваемых показателей, а именно, присутствию в нем «чистых» показателей, по которым за оцениваемый период не наблюдалось превышений ПДК. Так как УКИЗВ является средневзвешенным значением частных обобщенных индексов каждого из показателей, участвующих в оценке, наличие в расчете нулевых значений резко занижает его, а предусмотренная методикой возможность формирования собственных списков приоритетных показателей с учетом региональных особенностей создает предпосылки к снижению объективности получаемых оценок классов качества вод. Включая или исключая при расчете УКИЗВ «чистые» показатели, можно легко добиться требуемого качества.

Стандартный приоритетный перечень из 15 показателей, регламентированный РД 52.24.643–2002, не учитывает региональных геохимических особенностей территории, поэтому расчеты комбинаторного индекса в условиях высокого природного (фоновое) уровня содержания тех или иных веществ природного генезиса приводят к занижению качества воды. Проблема усугубляется отсутствием стандартизованных методик определения региональных фоновых концентраций, которые можно было бы в таких



Рис. 1. Карта-схема расположения станций гидрохимического мониторинга на р. Каме
 Fig. 1. Location of hydrochemical monitoring stations on the Kama River

случаях использовать при расчете УКИЗВ вместо предельно допустимых. В этой связи использование вероятностных подходов может оказаться весьма эффективным при необходимости сравнительных оценок качества вод различных водных объектов или их участков.

Целью исследования явилась оценка качества воды и ее пространственной изменчивости на участках нижнего течения реки Камы, а также сравнительная интерпретация полученных результатов с помощью УКИЗВ и вероятностных характеристик.

Материал и методы исследования

В расчетах показателей загрязненности вод использовали данные государственного мониторинга качества поверхностных вод Республики Татарстан (РТ), осуществляемого Министерством экологии и природных ресурсов РТ, за период 2014–2021 гг. Аналитический материал включал информацию по 11 гидрохимическим показателям качества вод нижнего течения р. Камы (Нижнекамское и Куйбышевское водохранилища), полученным для семи станций отбора проб: Красный Бор (ст. 1), Белоус (ст. 2), Бетьки (ст. 3), Елабуга (ст. 4), Красный ключ (ст. 5), Березовая Грива (ст. 6), Сорочьи Горы (ст. 7) (рис. 1).

Для проведения расчетов использовано 7695 значений гидрохимических показателей в 669 пробах воды.

Расчеты осуществлялись с помощью программных комплексов Statistica 6.0 и УКИЗВ-Plus (Валиев и др., 2021а).

Результаты и их обсуждение

Статистическая обработка аналитических данных показала, что средние и медианные концентрации общего железа и марганца в воде р. Камы были существенно выше предельно допустимых, что можно объяснить только фоновыми геохимическими особенностями вод бассейна (табл. 1). Отмечено нарастание загрязненности вод вниз по течению р. Камы (табл. 2) по ионам аммония ($r=0.27$; $p<0.01$), БПК₅ ($r=0.37$; $p<0.001$), ХПК ($r=0.22$; $p<0.01$), марганцу ($r=0.16$; $p<0.05$), нефтепродуктам ($r=0.39$; $p<0.001$) и сульфатам ($r=0.15$; $p<0.05$).

Расчет удельных комбинаторных индексов загрязненности в целом подтверждает выявленную тенденцию (табл. 3).

Несмотря на снижение удельного комбинаторного индекса загрязненности на станции 4, значения вероятности обнаружения превышения ПДК загрязняющих веществ в воде методом Байеса (Валиев и др., 2021b, 2022) свидетельствуют о том, что частота превышений допустимых значений не только снизилась, но стала даже несколько выше (рис. 2). Полученная картина иллюстрирует проблему расчета УКИЗВ при наличии «чистых» (без превышений ПДК) и «грязных» (с превышениями ПДК) гидрохимических показателей. Если концентрации железа и марганца за весь период наблюдений за качеством вод р. Камы превышали ПДК в 75 и 95% проб, соответственно, то по нитратам, хлоридам и нефтепродуктам ни в одной из проб не отмечалось превышений их нормативных значений.

Добиться коррекции оценочных гидрохимических индексов можно путем применения для наиболее «грязных» показателей их медианных значений, устанавливаемых расчетным путем для данного водного объекта на основании имеющихся рядов наблюдений. В случае, если медианная концентрация того или иного исследуемого показателя превышает предельно допустимую, при расчетах УКИЗВ значение последней нужно заменять на медианное. В этом случае скорректированный показатель удельного комбинаторного индекса загрязненности вод (УКИЗВ_{корр}) будет в полной мере учитывать региональные геохимические особенности территории, а распределение его значений по участкам водного объекта будет приближено к байесовой вероятностной оценке (рис. 2). В результате коррекции распределение удельных комбинаторных индексов загрязненности, рассчитанных для разных участков акватории, приобретает более закономерный вид, учи-

Таблица 1. Статистическая характеристика гидрохимических показателей качества вод р. Камы на участке Красный Бор – Сорочьи Горы

Table 1. Statistical characteristics of hydrochemical indicators of water quality of the river Kama on the section Krasny Bor – Sorochi Gory

Показатель Variable	n	ПДК MPL	Среднее Average	Медиана Median	Стандартное отклонение St. deviation
Аммоний ион, мг/дм ³	660	0.5	0.31	0.25	0.27
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	649	2.00	1.66	1.60	0.76
Железо общее, мг/дм ³	668	0.10	0.20	0.18	0.13
Кислород раствор., мгО ₂ /дм ³	579	4.0	10.0	10.2	52.6
Марганец, мг/дм ³	659	0.010	0.072	0.060	0.058
Нефтепродукты, мг/дм ³	512	0.05	0.03	0.02	0.03
Нитраты, мг/дм ³	659	40.0	2.8	2.2	2.8
Нитриты, мг/дм ³	657	0.08	0.05	0.03	0.21
Сульфаты, мг/дм ³	669	100	61.9	58.7	26.7
Хлориды, мг/дм ³	666	300	43.7	38.5	23.0
ХПК, мгО ₂ /дм ³	659	30	18.7	18.0	5.9

Таблица 2. Медианы гидрохимических показателей качества вод р. Камы по станциям мониторинга
Table 2. Medians of hydrochemical indicators of water quality of the river Kama by monitoring stations

Показатели Variables	Станции наблюдений / Stations						
	1	2	3	4	5	6	7
Аммоний ион, мг/дм ³	0.22	0.20	0.21	0.214	0.34	0.38	0.26
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	1.42	1.45	1.43	1.38	2.1	2.18	1.13
Железо общ., мг/дм ³	0.20	0.16	0.17	0.14	0.22	0.24	0.15
Кислород раствор., мгО ₂ /дм ³	10.5	10.4	10.0	10.3	10.6	10.2	9.2
Марганец, мг/дм ³	0.05	0.059	0.059	0.06	0.07	0.09	0.05
Нефтепродукты, мг/дм ³	0.02	0.02	0.02	0.02	0.05	0.05	0.03
Нитраты, мг/дм ³	2.6	2.3	2.3	2.1	1.7	2.0	2.4
Нитриты, мг/дм ³	0.02	0.03	0.032	0.03	0.02	0.04	0.03
Сульфаты, мг/дм ³	50.8	56.3	57.8	60.0	60.5	74.7	58.2
Хлориды, мг/дм ³	43.8	39.4	39.6	39.8	32.2	49.3	30.1
ХПК, мг О ₂ /дм ³	17.3	16.6	15.3	16.8	20.4	21.0	17.0

тывающий фоновое содержание веществ двойного генезиса. Классы загрязненности снижаются в основном за счет отсутствия при скорректированном расчете критических показателей загрязненности ($S_{об} > 9$) (табл. 3).

Дополнительное использование вероятностных статистических методов при расчете УКИЗВ позволяет не только адекватно оценить гидрохимическую ситуацию на водном объекте в целом, но и осуществить корректный расчет комбинаторных индексов, получив таким образом объективную оценку качества вод, отражающую фактическую гидрохимическую ситуацию. Вероятностную характеристику, полученную по уравне-

нию Байеса, можно рассматривать как критерий правильно определенных частотных показателей загрязненности, так как при ее расчете используются как априорные, так и апостериорные вероятности, что позволяет оценивать качество вод на отдельных створах с учетом гидрохимической ситуации по всему водному объекту.

Заключение

Проведенное исследование позволило наглядно продемонстрировать некоторые особенности гидрохимической оценки качества поверхностных вод по гидрохимическим показателям с применением комплексного подхода, регламентиро-

Таблица 3. Значения комбинаторного и удельного комбинаторного индексов загрязненности вод на различных участках акватории р. Камы
 Table 3. The values of the combinatorial and specific combinatorial indices of water pollution in different parts of the water area of the river Kama

Показатель Variable	Комбинаторный индекс загрязненности ($S_{об.}$) Combinatorial pollution index (S_{tot})						
	1	2	3	4	5	6	7
Аммоний ион, мг/дм ³	1.8	2.6	2.3	1.9	5.1	4.7	3.8
БПК ₅ , мгО ₂ /дм ³	2.9	2.8	2.6	2.6	4.8	5.3	2.3
Железо общее, мг/дм ³	8.5	8.1	8.2	8.2	8.3	8.3	8.2
Кислород раствор., мгО ₂ /дм ³	1.2	0	0	0	0	0	1.4
Марганец, мг/дм ³	11.1	10.2	11.2	10.4	10.9	12.0	10.2
Нефтепродукты, мг/дм ³	0	2.8	2.4	0	7.0	6.5	2.1
Нитраты, мг/дм ³	0	0	0	0	0	0	0
Нитриты, мг/дм ³	3.2	1.8	4.0	2.1	2.3	2.9	4.3
Сульфаты, мг/дм ³	1.9	1.9	1.6	1.8	2.5	2.8	2.0
Хлориды, мг/дм ³	0	0	0	0	0	0	0
ХПК, мг О ₂ /дм ³	1.0	1.7	1.4	2	0	1.4	1.8
УКИЗВ (с учетом КПЗ)	3.2	3.2	3.4	2.9	4.1	4.4	3.6
Класс качества	Очень загрязненная 3б класс			Загрязненная 3а класс	Грязная 4а класс		Очень загрязненная 3б класс
УКИЗВ _{корр.} (с учетом медиан)	2.5	2.3	2.2	2.3	3.1	3.4	2.7
Класс качества	Загрязненная 3а класс				Очень загрязненная 3б класс		Загрязненная 3а класс

ванного РД 52.24.643–2002. В случае «загрязнения», обусловленного повышенным геохимическим фоном элементов и соединений в почвах и породах исследуемых речных бассейнов, те показатели качества вод, среднемноголетние значения

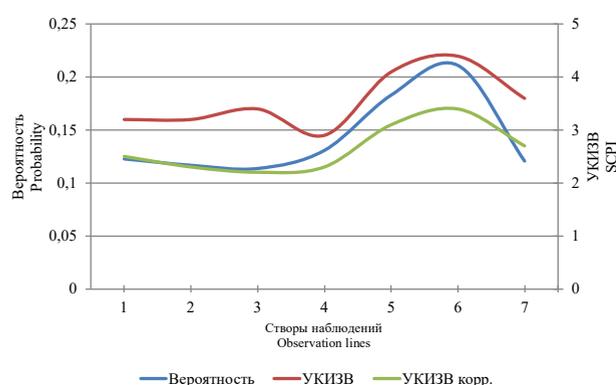


Рис. 2. Изменчивость вероятностных характеристик загрязненности и УКИЗВ по створам наблюдений

Fig. 2. Variability of probabilistic characteristics of pollution and specific combinatorial pollution index (SCPI) by observation sites

которых превышают ПДК, должны оцениваться по региональному фоновому значению, в качестве которого предлагается использовать статистическую медиану многолетней выборки наблюдений. Использование медианы вместо ПДК позволяет более объективно оценивать локальные условия, сопоставляя их со всей наблюдаемой изменчивостью того или иного показателя. В качестве внешнего аудитора объективности формируемых оценок предложено использовать расчет байесовой вероятности превышения порогов. Так как вероятностная характеристика превышения ПДК основана как на априорных, так и на апостериорных вероятностях, она оценивает долю наблюдаемых на конкретном участке превышений с учетом подобных превышений на всех участках за весь период наблюдений.

Список литературы

1. Валиев В.С., Хасанов Р.Р., Шамаев Д.Е. Автоматизация обработки первичных данных мониторинга качества вод и донных отложений поверхностных водных объектов // Российский журнал прикладной экологии. 2021а. №3. С. 30–35. doi: 10.24852/2411-7374.2021.3.30.35.

2. Валиев В.С., Шамаев Д.Е., Иванов Д.В. Вероятностные подходы к оценке загрязненности поверхностных вод // Российский журнал прикладной экологии. 2021b. №3. С. 36–42. doi: 10.24852/2411-7374.2021.3.36.42.

3. Валиев В.С., Шамаев Д.Е., Хасанов Р.Р., Иванов Д.В., Шагидуллина Р.А., Шагидуллин Р.Р. Алгоритмы интерпретации показателей качества поверхностных вод // Российский журнал прикладной экологии. 2022. №1. С. 23–30. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.23.30>.

4. РД 52.24.643–2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям.

References

1. Valiev V.S., Khasanov R.R., Shamaev D.E. Avtomatizaciya obrabotki pervichnyh dannyh monitoringa kachestva vod i donnyh otlozhenij poverhnostnyh vodnyh ob'ektov [Automation of processing of primary data for monitoring the quality of waters and bottom sediments of surface water bodies] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2021a. No 3. P. 30–35. doi: 10.24852/2411-7374.2021.3.30.35.

2. Valiev V.S., Shamaev D.E., Ivanov D.V. Veroyatnostnye podhody k ocenke zagryaznennosti poverhnostnyh vod [Probabilistic approaches to the assessment of surface water pollution] // Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2021b. No 3. P. 36–42. doi: 10.24852/2411-7374.2021.3.36.42.

3. Valiev V.S., Shamaev D.E., Khasanov R.R., Ivanov D.V., Shagidullina R.A., Shagidullin R.R. Algorithms for interpreting of the surface water quality indicators Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian journal of applied ecology]. 2022. No 1. P.

23–30. <https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.1.23.30>.

4. RD 52.24.643–2002. Metod kompleksnoj ocenki stepeni zagryaznennosti poverhnostnyh vod po gidrohimicheskim pokazatelyam [A method of complex assessment of the degree of contamination of surface waters by hydrochemical indicators].

Valiev V.S., Ivanov D.V., Khasanov R.R., Shamaev D.E. **Correction of specific combinatorial indices of water pollution taking into account the background component.**

The article presents an assessment of water quality and its spatial variability in the sections of the lower reaches of the Kama River, a comparative interpretation of the results obtained using the specific combinatorial pollution index and probabilistic characteristics, and considers the problems that arise in the evaluation of hydrochemical data series. The shortcomings of the method of complex assessment of the degree of pollution of surface waters and ways to solve them are indicated. In situations where the average long-term values of hydrochemical parameters in the studied section (water body) exceed the established MPC, it is necessary to use their background concentrations as the threshold, calculated as the median of the corresponding sample.

Keywords: water quality; pollution index; probabilistic assessment; monitoring; Kama River.

Раскрытие информации о конфликте интересов: Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / Disclosure of conflict of interest information: The author claims no conflict of interest

Информация о статье / Information about the article

Поступила в редакцию / Entered the editorial office: 01.02.2023

Одобрено рецензентами / Approved by reviewers: 15.02.2023

Принята к публикации / Accepted for publication: 20.02.2023

Информация об авторах

Валиев Всеволод Сергеевич, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: podrost@mail.ru.

Иванов Дмитрий Владимирович, кандидат биологических наук, зам. директора по научной работе, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: water-rf@mail.ru.

Шамаев Денис Евгеньевич, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: ds1991n@gmail.com.

Хасанов Рустам Равилевич, младший научный сотрудник, Институт проблем экологии и недропользования АН РТ, 420087, Россия, г. Казань, ул. Даурская, 28, E-mail: rustamkhasanov88@gmail.com.

Information about the authors

Vsevolod S. Valiev, Senior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, Russia, 420087, E-mail: podrost@mail.ru.

Dmitrii V. Ivanov, Ph.D. in Biology, Deputy Director, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya st., Kazan, Russia, 420087, E-mail: water-rf@mail.ru.

Denis E. Shamaev, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya St., Kazan, Russia, 420087, E-mail: ds1991n@gmail.com.

Rustam R. Khasanov, Junior Researcher, Research Institute for Problems of Ecology and Mineral Wealth Use of Tatarstan Academy of Sciences, 28, Daur'skaya St., Kazan, Russia, 420087, E-mail: rustamkhasanov88@gmail.com.

