

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ВОДОТОКОВ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ПРЕССА

**Е.А. Шашуловская, С.А. Мосияш, О.В. Шашуловская,
И.Г. Филимонова, Л.В. Гришина, Е.Г. Кузина**

E-mail: shash.elena2010@yandex.ru

ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Саратовский филиал, г. Саратов, Россия

АННОТАЦИЯ: Дана оценка экологического состояния девяти рек с разным уровнем антропогенной нагрузки, относящихся к бассейнам Волги, Дона и Урала. Качество воды оценено на основе широко применяемого удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ), а также статистических критериев, основанных на данных многолетнего экологического мониторинга: показателя пластичности, как меры устойчивости экосистемы, и функции желательности. Гидрохимические исследования включали определение кислородного режима, солевого состава, содержания органического вещества, биогенных и токсичных элементов. Рассчитанные УКИЗВ колебались в интервале 3,0–5,4, что соответствует категории качества «очень загрязненные» – «грязные». Наибольший вклад в оценку степени загрязненности воды вносят не только концентрации техногенных металлов, но и показатели содержания органического вещества, количество которого зависит от уровня биопродукционных процессов. Метод главных компонент позволил структурировать индексы, рассчитанные для каждой реки, и объяснить информацию, представленную в исходных переменных.

По результатам анализа отобраны две главные компоненты: первый фактор интегрирует отрицательную связь величины УКИЗВ с длиной реки, второй объединил экологические критерии – функцию желательности и показатель пластичности, т. е. статистические показатели, основанные на данных многолетнего гидрохимического мониторинга и учитывающие реальное экологическое состояние природных водных систем. Кластерный анализ полученных статистических индексов позволил разделить исследованные реки по качеству водной среды на четыре группы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: река, экологическое состояние, гидрохимический мониторинг, удельный комбинаторный индекс загрязненности воды, показатель пластичности, функция желательности, антропогенный пресс.

Антропогенное воздействие на речные экосистемы в виде зарегулирования стока, сброса промышленных, сельскохозяйственных и коммунальных сточных вод приводит к нарушению гидрохимического режима рек, изменению структурно-функциональных характеристик сообществ гидробионтов, что, в конечном итоге, снижает самоочищающую способность водотоков и ухудшает их экологическое состояние.

© Шашуловская Е.А., Мосияш С.А., Шашуловская О.В., Филимонова И.Г., Гришина Л.В., Кузина Е.Г., 2021

В настоящее время система нормирования качества вод в России базируется на определении в лабораторных условиях предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных веществ [1] и расчете на их основе удельного комбинаторного индекса загрязненности воды (УКИЗВ). При оценке качества вод в России распространены и другие интегральные индексы, основанные на определенных в лабораторных условиях ПДК, необходимых для совокупной оценки и сопоставления степени загрязнения водных объектов или их участков. Наиболее известные из них с определенной долей научной критики представлены в работах [2–5]. Основными концептуальными недостатками этих методик являются экстраполяция нормативов «лабораторных» ПДК на реальные природные объекты, недостаточный учет синергического, аддитивного или антагонистического взаимодействия между многокомпонентным составом природных вод, невозможность учета специфики функционирования водных экосистем в различных природно-климатических зонах и биогеохимических провинциях и т. д.

Качество вод в нашей стране принято рассматривать с позиции водопользователей [6], которые, как правило, предъявляют различные требования. В последние десятилетия была пересмотрена изначальная антропоцентрическая направленность экологического законодательства. Современное понимание нормативов качества окружающей среды связывается не только с пригодностью воды для использования в интересах населения и экономики, но и с обеспечением здоровья водной экосистемы, ее устойчивого функционирования и предотвращения деградации [7–10]. Оценить состояние водных экосистем в условиях изменения не только естественных абиотических факторов, но и антропогенного воздействия возможно с помощью экологических статистических критериев, основанных на данных многолетнего гидрохимического мониторинга. В этом контексте задачей проведенного исследования стала сравнительная оценка качества воды рек с разным уровнем антропогенной нагрузки на основе широко применяемых УКИЗВ и статистических индексов (функции желательности, показателя пластичности).

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Данная работа является продолжением и обобщением проведенных ранее исследований по оценке качества рек различных бассейнов [11–13]. Объекты исследования – реки Волжского, Донского и Уральского бассейнов в пределах Саратовской, Пензенской и Оренбургской областей (табл. 1).

Отбор проб осуществляли с поверхностного горизонта в вегетационный период 2015–2018 гг. Оценку качества воды проводили по показателям кислородного режима, солевого состава, органического вещества, биогенных и токсичных элементов. Обработку гидрохимического материала осуществляли по общепринятым методикам фотометрического, титриметрического анализов и инверсионной вольтамперометрии [14–15]. Всего было обработано 116 проб. При характеристике гидрохимического состава воды рек использовали средневегетационные концентрации.

Таблица 1. Некоторые характеристики исследованных рек
Table 1. Some characteristics of the studied rivers

Название водотока	Водосборный бассейн	Длина реки, км
р. Березина	Волжский	10
р. Елшанка	Волжский	26
р. Курдюм	Волжский	53
р. Уза	Волжский	188
р. Еруслан	Волжский	278
р. Сура	Волжский	841
р. Медведица	Донской	745
р. Хопер	Донской	980
р. Сакмара	Уральский	798

Расчет УКИЗВ проводили по методике [16] по 15 гидрохимическим показателям. Для оценки экологического состояния водных объектов использовали показатель пластичности экосистемы и функцию желательности [17–18]. Показатель пластичности экосистемы соответствует ее способности сохранять внутренние взаимосвязи при возмущении состояния. Г.Е. Михайловский предлагает усредненный модуль $|\bar{r}_i|$ коэффициентов корреляции параметров экосистемы, соответствующий средней силе корреляционных связей в ней, интерпретировать как ее пластичность (надежность) и считать этот показатель мерой устойчивости экосистемы [19, 20].

Многочисленные гидрохимические показатели имеют различную размерность, что делает невозможным их непосредственное усреднение. Использование функции желательности решает эту проблему, позволяя объединить в единый показатель разные параметры, а оценку состояния экосистемы перевести в числовую шкалу с фиксированными границами от 0 до 1, что соответствует градациям «плохо – хорошо».

Обобщенная функция желательности (D) рассчитана по формуле [18]:

$$D = \sqrt[n]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3 \dots d_n}, \quad (1)$$

где d_i – частная функция желательности, n – число показателей.

Для показателей, увеличение количественных значений которых «желательно», применяли выражение:

$$d_i = \frac{2 \cdot (x_i \cdot x_{min})}{(x_i^2 + x_{min}^2)}. \quad (2)$$

В случае, когда увеличение гидрохимических показателей «нежелательно», использовали формулу:

$$d_i = \frac{2 \cdot (x_i \cdot x_{max})}{(x_i^2 + x_{max}^2)}. \quad (3)$$

По 15 гидрохимическим показателям рассчитана функция желательности для каждой исследованной реки. Увеличение содержания растворенно-

го кислорода было «желательным», повышение концентраций остальных определяемых ингредиентов – «нежелательным».

Чтобы выделить факторы, определяющие изменчивость рассчитанных индексов экологического состояния водных объектов, использовали метод главных компонент [21–22]. Критерием для выделения оптимального числа факторов служили собственные значения, являющиеся дисперсиями главных компонент. Для повышения интерпретируемости факторов использовали процедуру вращения осей координат факторного пространства методом «варимакс». Рассматривались только те главные компоненты, дисперсии которых больше единицы. Абсолютное значение нагрузки 0,7 и выше принимается за существенную связь, ниже 0,7 – предполагается отсутствие связи. Наличие существенной связи указывает на согласованное изменение исходных гидрохимических показателей под действием того или иного скрытого главного фактора. Для сравнительной оценки полученных о качестве воды результатов применяли кластерный анализ, который раскрывает внутреннюю структуру набора данных без принятия априорного предположения об их качестве с целью классификации объектов системы в категории или кластеры на основе их близости или сходства.

Статистическую обработку данных проводили с использованием стандартных процедур программной среды Microsoft Excel, а также специализированного пакета программы Statistica 10. Нормальность распределения проверена с помощью теста Колмогорова–Смирнова.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По величине минерализации и содержанию основных ионов исследуемые реки можно разделить на две группы. Реки Березина, Курдюм и Елшанка отличаются повышенной или высокой минерализацией (841–1477 мг/дм³), преобладающими ионами являются кальций, гидрокарбонаты или сульфаты [13]. Вода этих рек жесткая или очень жесткая. Остальные исследованные реки характеризуются средней минерализацией (246–532 мг/дм³) и относятся к гидрокарбонатному классу группы кальция или магния, жесткость умеренная до жесткой. Величина минерализации обусловлена особенностями геологического строения территории водосборного бассейна, взаимодействием речных вод с засоленными подземными водами, в связи с чем в некоторых реках (например, в р. Сакмаре) меняется соотношение преобладающих катионов, главным образом, магния или натрия.

По характеру водного режима все реки отличаются выраженным преобладанием весеннего стока, наличием летних и осенних подъемов воды под влиянием дождей. Как следствие, содержание главных ионов увеличивается от весны к осени. Кислородный режим рек в целом благоприятный для жизнедеятельности гидробионтов (выше 6,0 мг/дм³). Однако на некоторых участках рек Елшанка, Березина, Медведица, Хопер в летний период содержание O₂ снижалось до 3,82–4,82 мг/дм³.

Цветность и перманганатная окисляемость (ПО) характеризуют, главным образом, концентрацию в воде окрашенных гуминовых веществ аллохтонного происхождения. В исследованных реках между средними концентрациями этих показателей в весенний период наблюдалась достоверная связь ($r=0,84$, $p=0,043$). Цветность изменялась в диапазоне 14,4–38,8 град., минимальные концентрации характерны для р. Сакмары, максимальные – для малых рек Березина, Елшанка, Курдюм [13]. Наименьшие значения ПО ($4,3 \text{ мг/дм}^3$) также отмечены для Сакмары, наибольшие ($6,3\text{--}7,0 \text{ мг/дм}^3$) – для рек Еруслан и Курдюм.

Содержание общего органического вещества (ОВ) в реках по показателю ХПК изменялось в пределах 16–51 мг/дм^3 (рис. 1). Самые высокие концентрации ($48\text{--}51 \text{ мг/дм}^3$) отмечены в водах малых рек Елшанка и Курдюм. В летний период сильный прогрев воды при небольших средних глубинах способствует увеличению скорости процессов образования и минерализации ОВ в этих водотоках.

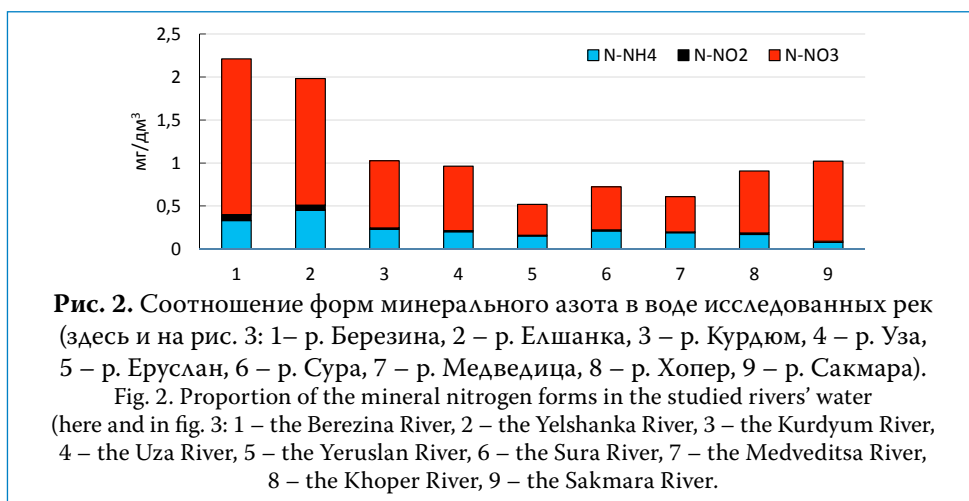
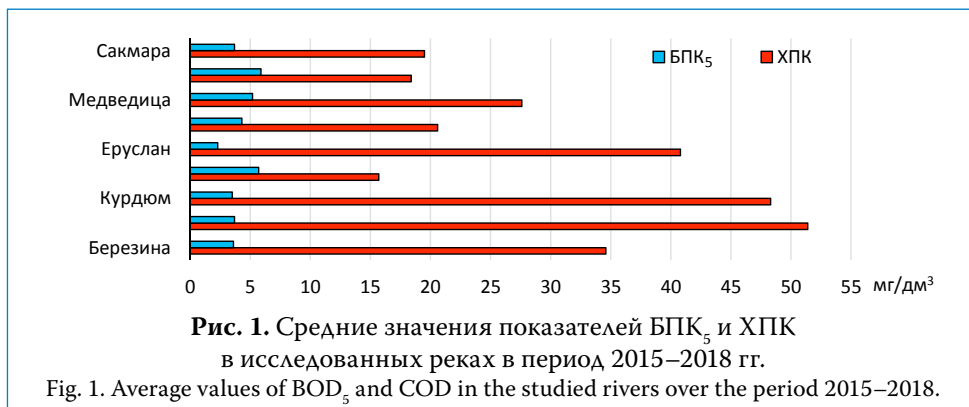
Во всех водных объектах показатель БПК₅, характеризующий легкоокисляемое органическое вещество, был выше нормы $2,0 \text{ мг/дм}^3$ (рис. 1). Наибольшие концентрации на уровне $2,9\text{--}3,0$ ПДК зафиксированы в реках Уза и Хопер.

Преобладающей формой минерального азота во всех реках являлся азот нитратный (рис. 2). Наибольшие концентрации наблюдали в Березине и Елшанке ($1,81\text{--}1,47 \text{ мг/дм}^3$ соответственно). В этих же водотоках превышение норматива по содержанию азота нитритов составило $2,5\text{--}2,9$ раза. Следует отметить, что нитриты являются неустойчивыми соединениями и при достаточно высоком содержании кислорода и отсутствии тормозящих биохимические процессы токсичных веществ, их содержание в воде низкое ($<0,006 \text{ мгN/дм}^3$). Повышенные концентрации нитритов могут свидетельствовать о присутствии токсикантов, влияющих на процесс нитрификации. Содержание аммонийного азота колебалось в интервале от $0,078 \text{ мгN/дм}^3$ в р. Сакмаре до $0,33\text{--}0,45 \text{ мгN/дм}^3$ в реках Елшанке и Березине (рис. 2).

Минимальное количество фосфатов отмечено в р. Сакмаре (на уровне $0,02 \text{ мгN/дм}^3$), максимальное – характерно для воды р. Медведицы ($0,37 \text{ мгN/дм}^3$) [11]. На других обследованных водных объектах содержание минерального фосфора колебалось в интервале $0,11\text{--}0,26 \text{ мг/дм}^3$.

Концентрация общего железа во всех водотоках превышала рыбохозяйственный норматив. Наиболее высокое содержание отмечено в воде рек Уза и Сура ($0,39\text{--}0,52 \text{ мг/дм}^3$ соответственно). Кремний изменялся в диапазоне $3,3\text{--}11,7 \text{ мг/дм}^3$, максимальные значения характерны для р. Уза.

Уровень антропогенной нагрузки определяли также по содержанию кадмия, свинца, меди и алюминия. Соединения кадмия находились на уровне аналитического нуля ($<0,0005 \text{ мг/дм}^3$). Концентрация свинца, в основном, колебалась в интервале $<0,0010$ до $0,0038 \text{ мг/дм}^3$. Однако на некоторых участках р. Узы отмечено превышение норматива в 1,8 раза.



Соединения меди относятся к наиболее распространенным загрязняющим природные водные экосистемы веществам [23]. Широкое применение в производстве и сильные комплексообразующие свойства позволяют соединениям меди мигрировать от источника загрязнения на большие расстояния. Наиболее высокие концентрации меди в диапазоне 0,0055–0,0099 мг/дм³ отмечены в малых реках Березина, Елшанке, Курдюм, часть русла которых проходит в промышленной зоне г. Саратова. Экстремально высокие концентрации на уровне 23–24 ПДК зафиксированы в р. Березина [13].

Река Сакмара протекает в так называемом уральском металлургическом регионе, источниками техногенного загрязнения которого являются предприятия цветной металлургии и добывающей промышленности [24]. В левобережье реки в районе Медногорского комбината (производство рафинированной меди) площадь золошлаковых отвалов составляла около 2,5 км². В отдельные годы в фоновом створе реки максимальная концентрация меди достигала 810 ПДК [24]. По результатам проведенных исследова-

ний в весенний период в воде р. Сакмары отмечено экстремальное превышение ПДК_{рх} в 51–69 раз при среднем значении 0,014 мг/дм³.

В последние годы достоверно установлено, что алюминий оказывает разноплановое токсическое воздействие на гидробионты и человека, поэтому необходимость контроля содержания этого элемента в воде природных водоемов не вызывает сомнения [25]. Средние концентрации алюминия в реках Волжского бассейна составили 6–12 ПДК, в реках Донского бассейна 3–12 ПДК. Наиболее высокое среднее содержание алюминия (экстремальные концентрации достигали 40–60 ПДК) характерно для воды р. Сакмары (18 ПДК), в бассейне которой, как было отмечено выше, находятся предприятия по производству фтористого алюминия.

Согласно рассчитанным УКИЗВ (табл. 2), класс качества воды исследованных водотоков находился в интервале «очень загрязненные» – «грязные». Наиболее «грязными» являются малые реки Березина, Елшанка, Курдюм. Следует также отметить, что в класс «очень загрязненные» наряду с р. Сакмарой, протекающей по так называемому металлургическому региону, попали и относительно благополучные реки Сура, Хопер, Медведица. Наибольшую долю в общую оценку степени загрязненности воды вносят концентрации свинца, меди, железа, алюминия, а также показатели содержания органического вещества – БПК₅, ХПК. И если первые два компонента природных вод имеют, как правило, антропогенный источник, то происхождение соединений железа и алюминия в водной среде может быть связано также и с геологическим строением водоносных горизонтов водосборной территории, а содержание органического вещества зависит от уровня биопродукционных процессов и сезона исследования.

Таблица 2. Уровень загрязненности рек по УКИЗВ

Table 2. The rivers' pollution level against SCWPI

Река	УКИЗВ	Класс качества воды
р. Березина	5,3	4 «а» грязная
р. Елшанка	5,4	4 «а» грязная
р. Курдюм	4,5	4 «а» грязная
р. Уза	3,0	3 «б» очень загрязненная
р. Еруслан	4,2	4 «а» грязная
р. Медведица	3,4	3 «б» очень загрязненная
р. Сакмара	3,1	3 «б» очень загрязненная
р. Сура	3,0	3 «б» очень загрязненная
р. Хопер	3,2	3 «б» очень загрязненная

Следует отметить, что расчет УКИЗВ производится для получения информации о степени загрязнения воды на основе выбранной совокупности показателей и предназначен, прежде всего, для принятия природоохранных решений с позиции «загрязнитель платит». При этом вся тяжесть

ответственности ложится на водопользователей. Вероятно, поэтому максимально ужесточаются расчеты для тех показателей, число случаев и кратность превышения нормативных значений у которых велико.

Результаты сравнительной оценки экологического состояния исследованных водных объектов с применением функции желательности и показателя пластичности представлены в табл. 3. Наиболее высокие показатели пластичности в интервале 0,40–0,49 характерны для рек Медведица, Еруслан, Хопер. Для этих рек отмечены и максимальные величины функции желательности (0,84–0,87). Вероятно, это наиболее чистые реки с небольшой антропогенной нагрузкой. Минимальные статистические индексы качества рассчитаны для рек Березина, Елшанка, Сакмара.

Таблица 3. Некоторые статистические показатели качества воды исследованных рек

Table 3. Some statistical indices of the studied rivers' water quality

Река	Функция желательности	Показатель пластичности
р. Березина	0,71	0,27
р. Елшанка	0,60	0,35
р. Курдюм	0,75	0,36
р. Уза	0,83	0,38
р. Еруслан	0,85	0,49
р. Медведица	0,87	0,40
р. Сакмара	0,74	0,29
р. Сура	0,76	0,32
р. Хопер	0,84	0,41

Наиболее достоверно, на наш взгляд, разделение качественных характеристик исследуемых рек на группы с помощью кластерного анализа с использованием полученных статистических индексов. На дендрограмме можно выделить четыре группы (рис. 3). К первой относятся Курдюм, Сура, Березина, Сакмара – наиболее загрязненные реки. Уза, Хопер, Медведица – наиболее чистые. Реки Елшанка и Еруслан образуют отдельные кластеры: Елшанка – самая грязная, характеризуется наименьшим показателем функции желательности, а Еруслан, как левобережный приток Волги, имеет специфические особенности гидрохимического режима.

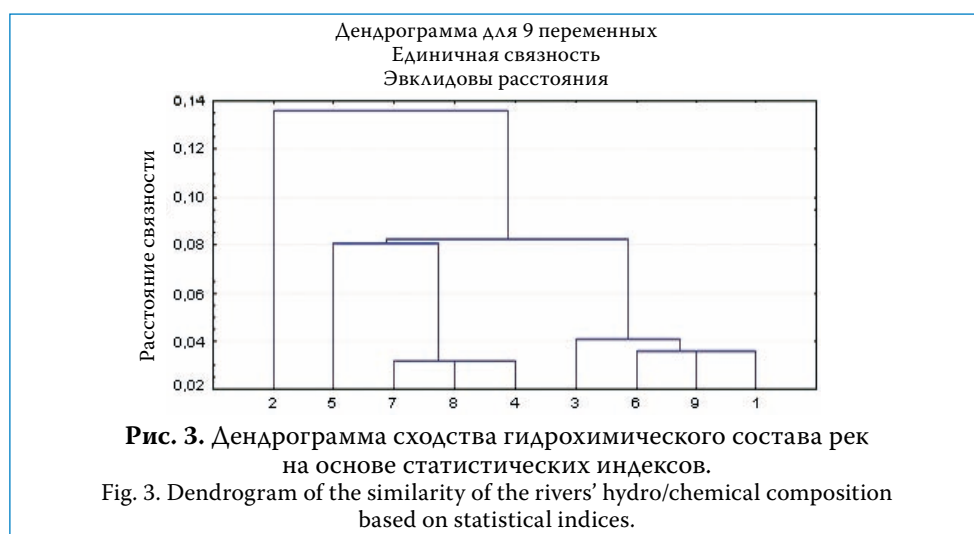
С целью структурирования рассчитанных для каждой реки индексов и объяснения заключенной в исходных переменных информации применялся метод главных компонент. По результатам анализа выбраны два фактора, вбирающие 61 и 29 % общей изменчивости соответственно (табл. 4).

Первый главный фактор тесно связан с УКИЗВ и длиной рек, причем связь эта отрицательная. Очевидно, качество воды снижается с уменьшением длины водотока. Благодаря своей полноводности крупные реки более устойчивы к антропогенным нагрузкам и медленнее реагируют на изме-

Таблица 4. Результаты анализа главных компонент
Table 4. Results of the main components analysis

Показатели	Главные факторы*	
	1	2
Функция желательности, D	0,56	0,76
Показатель пластичности	-0,03	0,96
УКИЗВ	-0,93	-0,19
Длина реки, км	0,93	0,03
Собственные значения ГК	2,44	1,14
Дисперсия, %	61,1	28,5

Примечание: * – приведены главные компоненты, собственные значения которых более 1; жирным шрифтом отмечены значимые нагрузки.



нения условий окружающей среды. Малые реки, наоборот, более чувствительны к различным видам загрязнения и имеют сравнительно низкую самоочищающую способность, а их состояние в большей мере определяется процессами, происходящими на водосборе. Второй фактор включает экологические критерии – функцию желательности и показатель пластичности, т. е. статистические индексы, основанные на многолетнем гидрохимическом мониторинге и учитывающие реальное экологическое состояние реки в различные сезоны при изменении условий на водосборной территории [12]. Первую компоненту можно условно интерпретировать как «способность к самоочищению», вторую – как «меру устойчивости». Таким образом, изменения рассчитанных для каждой реки индексов происходят под воздействием двух факторов, в основе которых лежит способность водной экосистемы поддерживать определенный гомеостаз, а значит, свое «здоровье», т. е. устойчиво функционировать и противостоять деградации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования гидрохимического режима девяти водотоков, относящихся к различным бассейнам, показали их значительные отличия. Малые реки Березина и Елшанка характеризуются не только повышенной минерализацией, но и максимальными величинами аллохтонного и общего органического вещества, минерального азота. Река Сакмара, протекающая по территории уральского металлургического региона, отличается минимальным количеством аллохтонной органики и минерального фосфора, а также высокими концентрациями меди и алюминия. Наиболее высокие концентрации железа обнаружены в реках Сура и Уза, минерального фосфора – в р. Медведице.

Все исследованные реки по индексу УКИЗВ отнесены к категориям «очень загрязненные» – «грязные», при этом в класс «очень загрязненных», наряду с р. Сакмарой, попали и относительно благополучные реки – Сура, Хопер, Медведица. При расчете индекса учитываются не только концентрации техногенных элементов, но и показатели содержания органического вещества, количество которого связано с уровнем биопродукционных процессов.

По значениям статистических индексов наиболее загрязненными являются протекающие по урбанизированной территории реки Березина и Елшанка и Сакмара, находящаяся в металлургическом регионе Оренбургской области. К более «здоровым» можно отнести Медведицу, Еруслан, Хопер и Узу.

Применение метода главных компонент для структурирования рассчитанных для каждой реки индексов позволило выявить два ключевых фактора, в основе которых лежит способность водной системы поддерживать определенный гомеостаз и таким образом противостоять антропогенной нагрузке и функционировать устойчиво.

Полученные результаты следует рассматривать как продолжение исследований по поиску экологических критериев оценки качества воды природных объектов с учетом антропогенных и климатических факторов, разработке эффективных природоохранных решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методические указания по установлению эколого-рыбохозяйственных нормативов (ПДК и ОБУВ) загрязняющих веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: Изд-во ВНИРО, 1998. 145 с.
2. *Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.* Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: Инс-т экологии Волжского бассейна РАН, 2003. 463 с.
3. *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.А.* Подходы к нормированию качества окружающей среды. Законодательные и научные основы существующих систем экологического нормирования // *Успехи современной биологии*. 2012. Т. 132. № 6. С. 531–550.
4. *Моисеенко Т.И.* Оценка качества вод и «здоровья» экосистем с позиций экологической парадигмы // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. 2017. № 3. С. 104–124. DOI: 10.35567/1999-4508-2017-3-7.

5. *Веницианов Е.В., Аджиенко Г.В., Возняк А.А., Чиганова М.А.* Современные проблемы оценки, регулирования и мониторинга качества поверхностных вод // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 1. С. 47–59. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-1-4.
6. ГОСТ 17.1.2.04-77. Показатели состояния и правила таксации рыбохозяйственных водных объектов. Режим доступа: <https://standartgost.ru> (дата обращения 20.05.2019).
7. Федеральный закон от 10 января 2002 г. № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды». Режим доступа: <http://base.garant.ru/12125350> (дата обращения: 25.10.2020).
8. *Измайлова А.В.* Критерии региональной оценки качества озерных водных ресурсов // Общество. Среда. Развитие. 2015. № 4. С. 176–181.
9. *Lu Y., R. Wang, Y. Zhang, H. Su, P. Wang, A. Jenkins, R. C. Ferrier, M. Bailey, and G. Squire.* Ecosystem Health Towards Sustainability // Ecosystem Health Towards Sustainability. 2015. № 1 (1). P. 1–15. DOI:10.1890/EHS14-0013.1.
10. *Зинченко Т.Д., Головатюк Л.В., Абросимова Э.В., Розенберг А.Г., Попченко Т.В.* Оценка качества воды лотических систем в рамках оптимизации экологической политики для обеспечения региональной безопасности и здоровья населения (на примере малых рек Самарской области) / Инновационные подходы к обеспечению устойчивого развития социо-эколого-экономических систем: мат-лы межд. конф. Самара: СГЭУ, 2018. С. 84–89.
11. *Шашуловская Е.А., Мосияш С.А., Филимонова И.Г.* Сравнительная оценка экологического состояния рек на основе некоторых статистических индексов // Рыбохозяйственные водоемы России: фундаментальные и прикладные исследования: мат-лы II Всеросс. науч. конф. Санкт-Петербург, 2018. С. 508–514. Режим доступа: http://mail.niorh.ru/download.pub/Conference/RVR_2018.pdf (дата обращения: 09.03.2020).
12. *Шашуловская Е.А., Мосияш С.А.* Экологическое состояние различных водотоков в условиях антропогенного пресса // Живые системы – 2019: сб. науч. ст. по материалам Межд. науч. конф. «Живые системы: передовые междисциплинарные технологии изучения, управления и сохранения». Саратов: Амирит, 2019. С. 162–164.
13. *Шашуловская О.В., Мосияш С.А.* Оценка экологического состояния малых рек, находящихся под сильным антропогенным прессом // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения: сб. науч. трудов по материалам Всерос. научно-практ. конф. Саратов: ООО «Амирит», 2019. Ч. I. С. 115–119.
14. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 541 с.
15. ПНД Ф 14.1: 2: 4. 69-96. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов кадмия, свинца, меди и цинка в питьевых, природных, морских и очищенных сточных водах методом инверсионной вольтамперометрии. М.: Аквилон, 2008.
16. РД 52.24.643 – 2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. СПб.: Гидрометеиздат, 2003. 49 с.
17. *Holling C.S.* Resilience and stability of ecological systems // Ann. Rev. Ecol. Syst. 1973. № 4. P. 1–23.
18. *Гелашвили Д.Б., Королев А.А., Басуров В.А.* Зонирование территории по степени нагрузки сточными водами с помощью обобщенной функции желательности // Поволжский экологический журнал. 2006. №2/3. С. 129–138.
19. *Михайловский Г.Е.* Описание и оценка состояния планктонных сообществ. М.: Наука, 1988. 214 с.

20. *Шашуловский В.А., Мосияш С.С.* Формирование биологических ресурсов Волгоградского водохранилища в ходе сукцессии его экосистемы. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2010. 249 с.
21. *Лиена И.Я.* Математические методы в биологических исследованиях. Факторный и компонентный анализы. Рига: Изд-во ЛатГУ, 1980. 104 с.
22. *Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин А.Д.* Прикладная статистика: классификация и снижение размерности. М.: Финансы и статистика, 1989. 333 с.
23. *Линник П.Н.* Медь в поверхностных водах Украины: содержание, формы нахождения, закономерности миграции // Гидробиологический журнал. 2013. Т. 49. № 5. С. 90–110.
24. *Чибилев А.А., Падалко Ю.А.* Современная антропогенная нагрузка в бассейне реки Сакмары и проблемы ее ограничения // Известия Самарского научного центра РАН. 2014. Т. 16. № 5. С. 304–307.
25. *Линник П.Н., Жежеря В.А.* Алюминий в поверхностных водах Украины: содержание, формы миграции, особенности распределения среди абиотических компонентов // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 2. С. 165–178.

Для цитирования: Шашуловская Е.А., Мосияш С.А., Шашуловская О.В., Филимонова И.Г., Гришина А.В., Кузина Е.Г. К вопросу оценки экологического состояния различных водотоков в условиях антропогенного пресса // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 2. С. 106–120.

Сведения об авторах:

Шашуловская Елена Александровна, канд. биол. наук, заведующая лабораторией рыбохозяйственной экологии, Саратовский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Россия, 410002, г. Саратов, ул. Чернышевского, 152; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Мосияш Светлана Александровна, канд. биол. наук., старший научный сотрудник, лаборатория рыбохозяйственной экологии, Саратовский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Россия, 410002, г. Саратов, ул. Чернышевского, 152; e-mail: mosiyashsa@yandex.ru

Шашуловская Ольга Владимировна, лаборант, лаборатория рыбохозяйственной экологии, Саратовский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Россия, 410002, г. Саратов, ул. Чернышевского, 152; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Филимонова Ирина Григорьевна, главный специалист, Саратовский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Россия, 410002, г. Саратов, ул. Чернышевского, 152; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Гришина Лилия Витальевна, старший специалист, Саратовский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Россия, 410002, г. Саратов, ул. Чернышевского, 152; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Кузина Елена Германовна, старший специалист, Саратовский филиал ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии», Россия, 410002, г. Саратов, ул. Чернышевского, 152; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

**ON THE ISSUE OF ASSESSING THE ECOLOGICAL STATE OF VARIOUS
WATERCOURSES IN THE CONDITIONS OF ANTHROPOGENIC PRESSURE****Elena A. Shashulovskaya, Svetlana A. Mosiyash, Olga V. Shashulovskaya,
Irina G. Filimonova, Liliya V. Grishina, Elena G. Kuzina***Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Saratov Branch, Saratov,
Russia*

Abstract: An assessment is given of the ecological state of nine rivers with different levels of anthropogenic load related to the Volga, the Don and the Ural basins. The water quality was assessed on the basis of several indices: the widely used specific combinatorial water pollution index (SCWPI), and statistical criteria based on the data of long-term environmental monitoring: the plasticity indicator as a measure of ecosystem sustainability and the desirability function. Hydro/chemical studies included indicators of oxygen regime, salt composition, organic matter, biogenic and toxic elements. The calculated SCWPI fluctuated in the range of 3,0–5,4, which corresponds to the quality category “very polluted” - “dirty”. The water of the lowest quality is in the small rivers Berezina and Elshanka, part of which is located in the industrial zone of the city of Saratov. The greatest contribution to the assessment of the degree of water pollution is made not only by the concentration of technogenic metals, but also by indicators of the content of organic matter, the amount of which depends on the level of bioproduction processes. The principal component analysis made it possible to structure the indices calculated for each river and to “explain” some of the information contained in the initial variables. Two main components were selected, based on the analysis results. The first factor integrates a negative relationship between the value of the UCIPI and the length of the river. Large rivers are more resistant to pollution due to their high water content. The second factor incorporated environmental criteria – the desirability function and the plasticity indicator, i.e. statistical indicators based on the data of long-term hydro/chemical monitoring and taking into account the real ecological state – “health” of natural water systems and their sustainable functioning. Cluster analysis of the obtained statistical indices made it possible to divide the studied rivers by the quality of the aquatic environment into 4 groups.

Key words: rivers, ecological state, hydro/chemical monitoring, SCWPI, plasticity index, desirability function, anthropogenic press.

About the authors:

Elena A. Shashulovskaya, Candidate of Biological Sciences, Head of the Laboratory of Fisheries Ecology, Russian Federal «Research Institute of Fisheries and Oceanography», Saratov branch, st. Chernyshevsky, 152, Saratov, 410002; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Svetlana A. Mosiyash, Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Fisheries Ecology, Russian Federal «Research Institute of Fisheries and Oceanography», Saratov branch, st. Chernyshevsky, 152, Saratov, 410002; e-mail: mosiyasha@yandex.ru

Olga V. Shashulovskaya, Laboratory Assistant of the laboratory of fishery ecology, Russian Federal «Research Institute of Fisheries and Oceanography», Saratov branch, st. Chernyshevsky, 152, Saratov, 410002; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Irina G. Filimonova, Chief Specialist of the Laboratory of Fisheries Ecology, Russian Federal «Research Institute of Fisheries and Oceanography», Saratov branch, st. Chernyshevsky, 152, Saratov, 410002; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Lilia V. Grishina, Senior Specialist of the laboratory of fishery ecology, Russian Federal «Research Institute of Fisheries and Oceanography», Saratov branch, st. Chernyshevsky, 152, Saratov, 410002; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

Elena G. Kuzina, Senior Specialist of the laboratory of fishery ecology, Russian Federal «Research Institute of Fisheries and Oceanography», Saratov branch, st. Chernyshevsky, 152, Saratov, 410002; e-mail: shash.elena2010@yandex.ru

For citation: *Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A., Shashulovskaya O.V., Filimonova I.G., Grishina L.V., Kuzina E.G. On the Issue of Assessing the Ecological State of Various Watercourses in the Conditions of Anthropogenic Pressure // Water Sector of Russia. 2021. No. 2. P. 106–120.*

REFERENCES

1. Metodicheskie ukazaniya po ustanovleniyu ekologo-rybohozyajstvennykh normativov (PDK i OBUV) zagryaznyayushchikh veshchestv dlya vody vodnykh obyektov, imeyushchikh rybohozyajstvennoe znachenie [Methodological guidelines for the establishment of ecological and fishery standards (MPC and TSEL) for pollutants for water in water bodies of fishery importance]. M.: BNIRO, 1988. 145 p.
2. *Shitikov V.K., Rozenberg G.S., Zinchenko T.D.* Kolichestvennaya gidroekologiya: metody sistemnoy identifikatsiyi. [Quantitative hydro/ecology: methods of systemic identification]. – Tol'yatti, Institut ekologiyi Volzhskogo basseyna RAN, 2003. 463 p.
3. *Risnik D.V., Belyaev S.D., Bulgakov N.G., Levich A.P., Maksimov V.N., Mamihin S.V., Mil'ko E.S., Fursova P.V., Rostovceva E.L.* Podkhody k normirovaniyu kachestva okruzhayushchey sredy. Zakonodatel'nye i nauchnye osnovy sushchestvuyushchikh sistem ekologicheskogo normirovaniya [Approaches to standardizing the quality of the environment. Legislative and scientific foundations of existing environmental regulation systems] // *Uspekhi sovremennoy biologii*. 2012. Vol. 132. № 6. P. 531–550.
4. *Moiseenko T.I.* Ocenka kachestva vod i «zdorov'ya» ekosistem s pozitsiy ekologicheckoy paradigmy [Assessment of water quality and “health” of ecosystems from the standpoint of the ecological paradigm] // *Vodnoe khozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologiyi, upravlenie*. 2017. № 3. P. 104–124.
5. *Venicianov E.V., Adzhienko G.V., Voznyak A.A., Chiganova M.A.* Sovremennye problemy otsenki, regulirovaniya i monitoringa kachestva poverkhnostnykh vod [Modern problems of assessment, regulation and monitoring of surface water quality] // *Vodnoe khozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*. 2018. № 1. P. 47–59.
6. GOST 17.1.2.04-77. Pokazateli sostoyaniya i pravila taksatsiyi rybokhozyajstvennykh vodnykh obyektov [Status indicators and taxation rules for fishery water bodies]. URL: <https://standartgot.ru> (data obrashcheniya 20.05.2019).
7. Federalnyj zakon ot 10 yanvarya 2002 g. N 7-FZ «Ob ohrane okruzhayushchey sredy» [On environmental protection] <http://base.garant.ru/12125350> (Data obrashcheniya: 25.10.2020).
8. *Izmajlova A.V.* Kriteriyi regionalnoy otsenki kachestva ozernykh vodnykh resursov [Criteria for regional assessment of the quality of lake water resources] // *Obshchestvo. Sreda. Razvitie*. 2015. № 4. P. 176–181.
9. *Lu Y., R. Wang, Y. Zhang, H. Su, P. Wang, A. Jenkins, R.C. Ferrier, M. Bailey, and G. Squire.* Ecosystem Health Towards Sustainability // *Ecosystem Health Towards Sustainability*. 2015. № 1 (1). P. 1-15. DOI:10.1890/EHS14-0013.1.
10. *Zinchenko T.D., Golovatyuk L.V., Abrosimova E.V., Rozenberg A.G., Popchenko T.V.* Otsenka kachestva vody loticheskikh sistem v ramkakh optimizatsiyi ekologicheckoy politiki dlya obespecheniya regional'noy bezopasnosti i zdorov'ya naseleniya (na primere malykh rek Samarskoj oblasti) [Assessment of water quality in lotic systems within the framework of optimization of environmental policy to ensure regional safety and health of the population (on the example of small rivers of the Samara region)]. *Innovacionnye podhody k obespecheniyu ustoychivogo razvitiya sotsio-ekologo-ekonomicheskikh sistem: materialy pyatoy Mezhdunarodnoy konferentsiyi*. Samara, SGEU, 2018. P. 84–89.
11. *Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A., Filimonova I.G.* Sravnitel'naya otsenka ekologicheckogo sostoyaniya rek na osnove nekotorykh statisticheskikh indeksov [Comparative assessment of the ecological state of rivers based on some statistical indices]// *Rybokhozyajstvenniye vodoemy Rossii: fundamentalniye i prikladnye issledovaniya. Materialy II Vserossiyskoy nauchnoy konferentsiyi*. Sankt-Petersburg, 2018. P. 508–514. URL: [http:// mail.niorh.ru/download.pub/Conference/RVR_2018.pdf](http://mail.niorh.ru/download.pub/Conference/RVR_2018.pdf) (Data obrashcheniya: 09.03.2020).

12. *Shashulovskaya E.A., Mosiyash S.A.* Ekologicheskoe sostoyanie razlichnykh vodotokov v usloviyakh antropogennogo pressa [The ecological state of various watercourses under anthropogenic pressure] / *Zhivye sistemy* – 2019: sbornik nauchnykh statej po materialam Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii «Zhivye sistemy: peredoviye mezhdisciplinarnye tekhnologii izucheniya, upravleniya i sokhraneniya». Saratov: Amirit, 2019. P. 162–164.
13. *Shashulovskaya O.V., Mosiyash S.A.* Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya malykh rek, nakhodyashchikhsya pod silnym antropogennym pressom [Assessment of the ecological state of small rivers under strong anthropogenic pressure] / *Ekologicheskij monitoring opasnykh promyshlennykh ob'ektov: sovremennyye dostizheniya, perspektivy i obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti naseleniya: sbornik nauchnykh trudov po materialam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsiyi*. Saratov: OOO «Amirit», 2019. Ch. I. P. 115–119.
14. Rukovodstvo po khimicheskomu analizu poverkhnostnykh vod sushi [Guide to the Chemical Analysis of Land Surface Waters]. L.: Gidrometeoizdat, 1977. 541 p.
15. PND F 14.1: 2. 4. 69-96. Metodika vypolneniya izmereniy massovoy koncentratsiyi ionov kadmiya, svintsa, medi i tsinka v pit'evykh, prirodnykh, morskikh i ochishchennykh stochnykh vodakh metodom inverzionnoy vol'tamperometriyi [Methods for measuring the mass concentration of cadmium, lead, copper and zinc ions in drinking, natural, sea and purified waste waters by stripping voltammetry]. M.: Akvilon, 2008.
16. RD 52.24.643 – 2002. Metodicheskie ukazaniya. Metod kompleksnoy otsenki stepeni zagryaznennosti poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam [Methodical instructions. A method for a comprehensive assessment of the degree of pollution of surface waters by hydro/chemical indicators.]. SPb.: Gidrometeoizdat, 2003. 49 p.
17. *Holling C.S.* Resilience and stability of ecological systems // *Ann.Rev.Ecol.Syst.* 1973. № 4. P. 1–23.
18. *Gelashvili D.B., Korolev A.A., Basurov V.A.* Zonirovanie territoriyi po stepeni nagruzki stochnymi vodami s pomoshch'yu obobshchennoy funktsiyi zhelatel'nosti [Territory zoning according to the degree of wastewater load using the generalized desirability function] // *Povolzhskiy ekologicheskij zhurnal*. 2006. №2/3. P. 129–138.
19. *Mikhaylovskiy G.E.* Opisanie i otsenka sostoyaniya planktonnykh soobshchestv [Description and assessment of the state of planktonic communities.] M.: Nauka, 1988. 214 p.
20. *Shashulovskiy V.A., Mosiyash S.S.* Formirovanie biologicheskikh resursov Volgogradskogo vodokhranilishcha v khode suksessiyi ego ekosistemy [Formation of biological resources of the Volgograd reservoir during the succession of its ecosystem.]. M.: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2010. 249 p.
21. *Liepa I.YA.* Matematicheskiye metody v biologicheskikh issledovaniyakh. Faktorniy i komponentniy analizy [Mathematical methods in biological research. Factor and component analyzes]. Riga: Izd-vo LatGU, 1980. 104 p.
22. *Ajvazyan S.A., Buhshtaber V.M., Enyukov I.S., Meshalkin L.D.* Prikladnaya statistika: klassifikatsiya i snizhenie razmernosti [Applied statistics: classification and dimensionality reduction]. M.: Finansy i statistika, 1989. 333 p.
23. *Linnik P.N.* Med v poverkhnostnykh vodakh Ukrainy: sodержanie, formy nakhozhdeniya, zakonmernosti migratsiyi [Copper in surface waters of Ukraine: content, forms of occurrence, patterns of migration] // *Gidrobiol. zhurnal*. 2013. Vol. 49. № 5. P. 90–110.
24. *Chibilev A.A., Padalko YU.A.* Sovremennaya antropogennaya nagruzka v bassejne reki Sakmary i problemy ee ogranicheniya [Modern anthropogenic load in the Sakmara river basin and problems of its limitation] // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*. 2014. Vol. 16. №5. P. 304–307.
25. *Linnik P.N., Zhezherya V.A.* Alyuminiy v poverkhnostnykh vodakh Ukrainy: sodержanie, formy migratsiyi, osobennosti raspredeleniya sredi abioticheskikh komponentov [Aluminum in surface waters of Ukraine: content, forms of migration, features of distribution among abiotic components] // *Vodnye resursy*. 2013. Vol. 40. №2. P. 165–178.