



Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г.Петрозаводск, пр.Ленина,33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<http://ecopri.ru>

№ 3 (45). Сентябрь, 2022

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

Редакционная коллегия

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
В. Krasnov
А. Gugotek
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г.Петрозаводск, пр. Ленина, 33. Каб. 453

E-mail: ecopri@psu.karelia.ru

<http://ecopri.ru>





УДК 574.58

ОЦЕНКА КРИТИЧЕСКИХ УРОВНЕЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВСТРЕЧАЕМОСТИ ВИДОВ МАКРОЗООБЕНТОСА

ШИТИКОВ
Владимир Кириллович

д. б. н., Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт экологии Волжского бассейна РАН,
stok1946@gmail.com

ЗИНЧЕНКО
Татьяна Дмитриевна

д. б. н., Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт экологии Волжского бассейна РАН,
zinchenko.tdz@yandex.ru

ГОЛОВАТЮК
Лариса Владимировна

к. б. н., Самарский федеральный исследовательский центр РАН,
Институт экологии Волжского бассейна РАН, gollarisa@mail.ru

Ключевые слова:

биоиндикация
экологический риск
техногенное загрязнение
водоемов
макрозообентос
многомерное
неметрическое
шкалирование
распределение
чувствительности видов

Аннотация: Описана методика обоснования экологического риска техногенного загрязнения водных объектов по результатам биоиндикации с использованием сообществ макрозообентоса. На первом этапе на основе статистических методов выполнялась оценка экстремальных значений гидрохимических показателей, при которых встречаемость каждого вида маловероятна. По этим данным моделировалось статистическое распределение чувствительности видов (SSD). Для иллюстрации методики использовались результаты многолетней гидробиологической съемки макрозообентоса на 102 малых и средних реках в бассейне Средней и Нижней Волги. Приведены пороговые значения восьми показателей загрязнения речной воды, обеспечивающие заданную допустимую вероятность экологического риска.

© Петрозаводский государственный университет

Рецензент: Н. А. Березина

Рецензент: Н. М. Калинкина

Получена: 22 июня 2022 года

Подписана к печати: 29 сентября 2022 года

Введение

Современная методология оценки экологического состояния природных водных объектов заключается в выявлении критических уровней воздействия, которые интерпретируются как «начало наиболее быстрой трансформации экосистемы либо как точка, после которой начинается выпадение основных компонентов биоценоза или разрушение системных связей» (Воробейчик и др., 1994). Эффективным способом выявления областей сверхнормативных техноген-

ных загрязнений в пределах исследуемой территории является биоиндикация, основанная на анализе встречаемости видов-индикаторов и оценке снижения показателей биоразнообразия ключевых сообществ.

Уменьшение обилия отдельных таксонов и видового богатства изучаемой группы организмов при увеличении концентрации токсичного ингредиента или их смеси обычно описывается статистическими моделями распределения чувствительности видов SSD (англ. *Species Sensitivity Distribution*).

Кривая SSD в своем классическом варианте (Aldenberg, Jaworska, 2000; Posthuma et al., 2001) определяет последовательность пороговых (критических) концентраций токсиканта HC_p (англ. *hazardous concentration*), которые будут опасными для p % наиболее чувствительных видов от их общего количества в сообществе и неэффективными для остальных.

Зависимость SSD интерпретируется как интегральная функция некоторого теоретического распределения вероятности, параметры которого оцениваются по выборке таксономических групп, имеющих установленные показатели токсикометрии: полулетальной LC_{50} или максимально недействующей концентрации NOEC (англ. *no observed effect concentration*). Для вероятностной оценки экологического риска опасности загрязнения изучаемой экосистемы по результатам выполненных наблюдений моделируется статистическое распределение действующих изоэффективных концентраций ЕС ксенобиотика. Тогда количественно риск оценивается в результате сравнения нормативной и эмпирической кривых распределения как вероятность $P(ЕС > HC_p)$ превышения эффекта вредного действия в реальных условиях над аналогичным эффектом, определяемым SSD (Verdonck et al., 2003; Шитиков, 2016; Spurgeon et al., 2020).

Традиционные методы оценки критических концентраций LC_{50} и NOEC требуют проведения трудоемких токсикометрических исследований, а выборка для моделирования SSD должна охватывать достаточно полный набор ключевых таксономических групп изучаемой экосистемы и быть статистически репрезентативной для каждого учитываемого токсиканта. В частности, корректная интерпретация кривой чувствительности возможна при числе анализируемых видов не менее 30 (Newman et al., 2000). Поэтому актуальным представляется поиск подходов, позволяющих проводить экспресс-оценку экологического состояния водоемов, основываясь только на данных натуральных наблюдений без проведения лабораторного эксперимента. Кроме того, в отличие от медицинской токсикологии, оценка влияния ксенобиотиков на экосистемном, биоценотическом или популяционном уровнях не сводится только к одним параметрам токсикометрии. Экотоксичность в более широком смысле принято характеризовать через понятия *вероятность опасности* или *экологический риск* посредством разработки ста-

статических моделей, включающих целый ряд качественных или полуколичественных показателей (Безель и др., 1994; Гелашвили и др., 2016).

Цель настоящей работы – обосновать метод построения кривых чувствительности видов и ориентировочной оценки критических уровней ксенобиотиков с использованием статистических моделей. При этом широко использовались методические материалы международного проекта ECOSAR (*Ecological Structure Activity Relationship*) (Solomon et al., 2008), в рамках которого проводился комплекс исследований экотоксичности различных сообществ гидробионтов (в составе океанов, бассейнов внутренних вод, микрокосмов и др.). Применимость предлагаемых методов рассматривается нами на примере отклика донных сообществ на изменение отдельных показателей качества вод малых и средних равнинных рек, протекающих в широких пределах природно-климатических зон от лесостепной до полупустынной и имеющих различный уровень антропогенного воздействия.

Материалы

Построение моделей распределения чувствительности видов донных сообществ по шкале гидрохимических факторов проводилось по результатам многолетних (1990–2020 гг.) исследований на территории Среднего и Нижнего Поволжья (Зинченко, 2011; Golovatyuk et al., 2018). Гидробиологическую съемку макрозообентоса проводили в разные месяцы вегетационного периода на 90 малых и 12 средних равнинных реках, притоках Куйбышевского, Саратовского и Волгоградского водохранилищ, в т. ч. на 6 реках аридного региона бассейна оз. Эльтон (см. карты в статье Головатюк и др., 2021). Всего было собрано 1400 проб с идентификацией 740 видов и таксонов рангом выше вида. На станциях отбора проб параллельно проводился мониторинг различных факторов среды, включающих показатели качества воды и содержание основных химических ингредиентов (в т. ч. состав донных грунтов, насыщение воды кислородом, минерализация, концентрация биогенных элементов и тяжелых металлов, загрязнение органическими веществами и др.). Далее в расчетах был сделан анализ влияния 8 наиболее репрезентативных гидрохимических показателей, измеренных в идентичных условиях и имеющих достаточный диапазон вариации.

Методы

Статистическую обработку в целях оценки критических уровней воздействия и построения кривых SSD по каждому рассматриваемому гидрохимическому показателю X проводили в два этапа. На первом этапе из базы данных для каждого вида из 740 извлекалась выборка наблюдаемых значений содержания поллютанта (x_1, \dots, x_n) со средним \bar{x} и стандартным отклонением σ . Если встречаемость вида в выборке $n > 5$, то оценивали верхний и нижний доверительные 95%-ные интервалы $CI = \bar{x} \pm t_{\alpha/2, n-1} \times \sigma / (n)^{0.5}$ на основе критических значений распределения Стьюдента t . Верхние доверительные величины CI принимали в качестве порогов чувствительности видов (точнее, максимальных неэффективных концентраций NOEC), поскольку вероятность их встречаемости в среде с еще большей концентрацией ксенобиотика равна 0.025. На втором этапе с использованием значений NOEC для всех отобранных видов выполняли построение модели теоретического логнормального распределения вероятности встречаемости видов. Доверительная полоса для каждой кривой SSD рассчитывалась с использованием параметрического бутстрепа (Шитиков, 2016).

Расчеты проводили с использованием языка и статистической среды R v. 3.6.1.

Результаты

На графиках распределения чувствительности (рисунок, а, б) точками показано положение пороговых концентраций (NOEC) для различных видов макрозообентоса на шкале некоторых показателей качества воды. По оси ординат представлена накопленная вероятность p того, что NOEC конкретного вида будет превышать эти значения для всего остального сообщества. Эмпирические точки аппроксимируются теоретическим логнормальным распределением, и качество подгонки определяется долей наблюдений, не выходящих за пределы 95%-ной доверительной полосы.

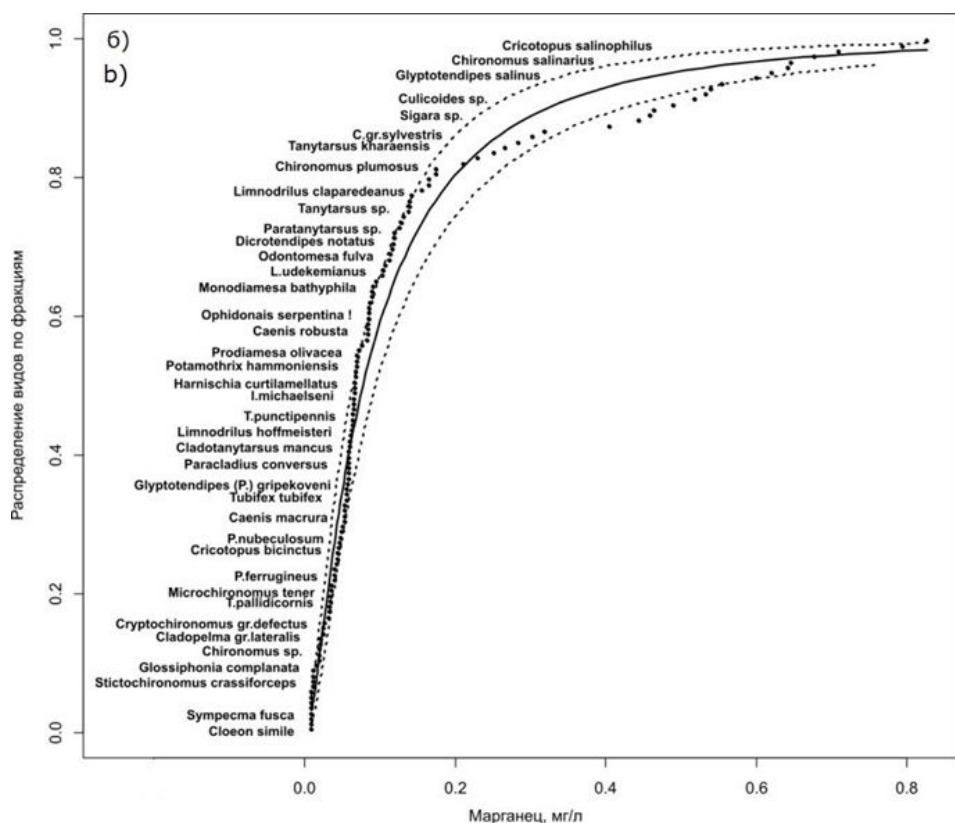
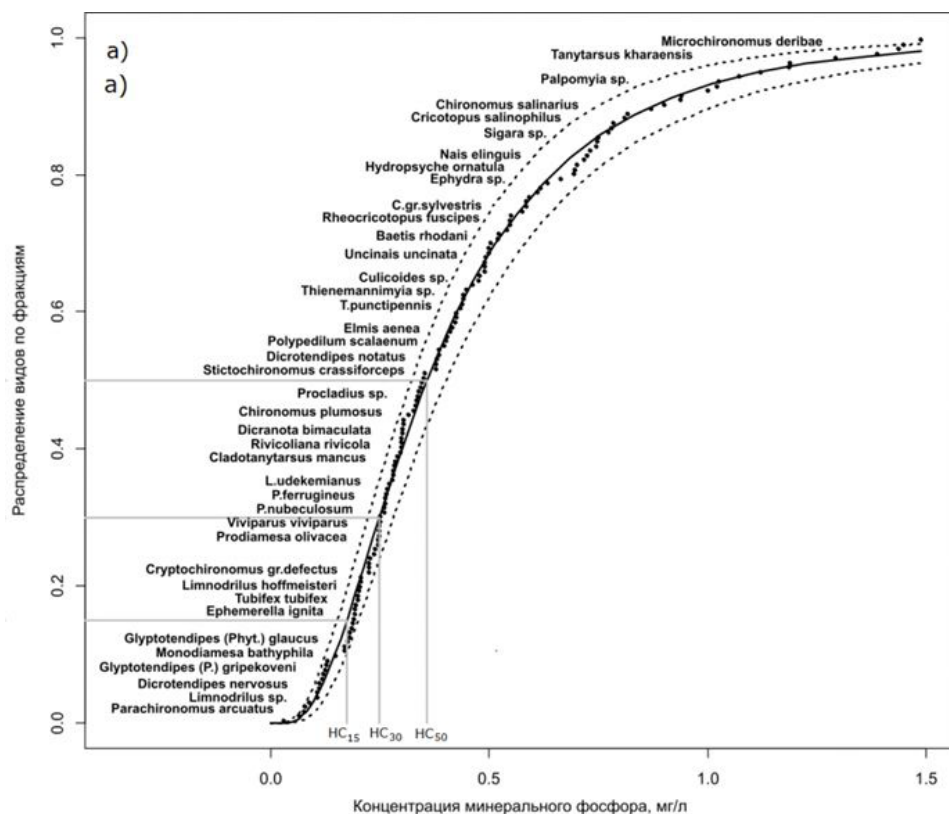
Если задаться произвольными критическими вероятностями, например $p = \{15, 30, \text{ и } 50\ \%\}$, то с использованием кривых распределений SSD можно оценить набор опасных концентраций HC_p воздействующего фактора (см. рисунок, а). Их смысл состоит в том, что при уровне воздействия, превышающем HC_p , из регионального пула выпадает p % наиболее чувствительных видов, поскольку их присутствие в сообществе становится маловероятным (таблица).

Кривые чувствительности для некоторых показателей, возрастание которых приводило к увеличению качества окружающей среды, таких как насыщение кислородом в таблице, интерпретировали в обратном порядке, т. е. критические концентрации находили для $(1 - p)$ % потенциально выпадающих фракций видов.

Обсуждение

Кривые чувствительности видов и вычисленные с их помощью пороговые концентрации гидрохимических показателей позволяют оперативно выполнить оценку качества воды: если для всех нормированных ингредиентов эмпирическое содержание не превышает HC_{15} , то водный объект квалифицируется как «чистый», а при превышении HC_{50} – «опасно загрязненный». Возможны и любые иные промежуточные градации оценок. Описанные методы могут быть также напрямую использованы в целях биоиндикации. Они позволяют легко установить как «потенциально чувствительные фракции» (PAF – *potentially affected fraction*) видов, которые выпадают из сообщества при уровне p % экологического риска, так и виды, устойчивые к каждому конкретному загрязняющему веществу, находящиеся в верхней части кривой SSD.

Нежелательные события, обуславливающие экологический риск, в общем случае могут происходить на уровне экосистемы, сообщества, отдельных видов, популяций или особей. Анализ распределения чувствительности видов связан только с одним узко определенным сегментом оценки риска – снижением видового разнообразия. Однако эта проблема и сейчас далека от своего полного методического решения. Использование токсикометрических показателей (NOEC, LD_{50}) необходимо и желательно, но их массовое определение для различных экотоксикантов и в отношении многочисленных видов гидробионтов практически нереально. Другим важным аргументом против традиционного подхода является механический перенос условий химического воздействия из лабораторных испытаний на условия конкретной природной экосистемы. При анализе SSD никак не используется информация об экологии сообществ (межвидовых взаимодействиях, трофических связях, условиях среды обитания или относительной значимости ключевых видов и функциональных групп). Поэтому актуальной альтернативой представляется оценка порогов токсическо-



Логнормальное распределение вероятности встречаемости видов макрозообентоса (сплошная линия) с верхней и нижней огибающими 95%-ной доверительной области (пунктиром) при различных уровнях гидрохимических показателей: а) содержания минерального фосфора, б) марганца

Lognormal distribution of the probability of occurrence of macrozoobenthos species (solid line) with upper and lower envelopes of 95% confidence region (dotted line) at different levels of hydrochemical indicators: a) the content of mineral phosphorus, b) that of manganese

Критические значения HC показателей загрязнения воды для различных уровней экологического риска p , рассчитанные по кривым распределения чувствительности донных сообществ (SSD)

Показатель загрязнения воды	Уровень экологического риска p		
	15 %	30 %	50 %
Минеральный фосфор, мг/л	0.174 ± 0.013	0.249 ± 0.0158	0.358 ± 0.021
Железо, мг/л	0.221 ± 0.015	0.311 ± 0.018	0.441 ± 0.024
Марганец, мг/л	0.0245 ± 0.0029	0.0434 ± 0.0043	0.0777 ± 0.0075
Медь, мг/л	0.0024 ± 0.0002	0.0038 ± 0.0003	0.0061 ± 0.0004
Аммонийный азот, мг/л	0.1629 ± 0.0212	0.3197 ± 0.036	0.638 ± 0.0681
Биохимическая окисляемость, мгО/л	22.14 ± 1.31	29.13 ± 1.43	38.57 ± 1.77
Общая минерализация, мг/л	486 ± 45	881 ± 70	1620 ± 127
Насыщение кислородом, %	152.5 ± 2.71	134 ± 2.04	117.4 ± 1.73

го действия в условиях пассивной схемы отбора проб из природной экосистемы.

Задача нормирования воздействий на основе «коллективного отклика» донных сообществ заключается в выборе приемлемого уровня экологического риска. Однако не ясно, какой долей p % видов можно пожертвовать, чтобы это не было критически опасным для экосистемы. Другой трудно-разрешимой проблемой при оценке НОЕС по данным натурных наблюдений является многокомпонентный и комбинаторный характер воздействия загрязняющих веществ (Smetanova et al., 2001). При этом нет никаких доказательств того, что отсутствие вида в пробе вызвано воздействием изучаемого экотоксиканта, а не какого-то иного фактора, либо просто случайными обстоятельствами.

Необходимо также отметить, что применение описанного подхода для оценки антропогенного воздействия ограничивается фоновыми геохимическими условиями каждого региона. Например, оцениваемый как приемлемый уровень минерализации в 500 мг/л сильно модифицирует влияние токсикантов и снижает токсичность многих тяжелых металлов. Пороговый уровень содержания минерального фосфора 174 мкг/л оценивался по токсикологическому признаку, но уже при гораздо меньших концентрациях этого вещества механизм опасного воздействия на водную экосистему связан с ее стремительным эвтрофированием. Слишком вы-

сокий порог насыщения кислородом (116 %) обусловлен большой долей проб, взятых с бактериальных матов соленых рек бассейна оз. Эльтон, т. е. критичен только для определенного пула очень оксифильных видов в конкретных водоемах. В этой связи выявленные критерии опасности будут иметь, вероятно, узко региональное применение.

Тем не менее рассматриваемый метод реализует один из возможных подходов к разработке оценки качества среды на надорганизменном уровне, что может служить лучшему пониманию реакции природных экосистем на антропогенное воздействие.

Заключение

На основе анализа видовой структуры макрозообентоса в малых равнинных реках бассейна Средней и Нижней Волги нами показана возможность проведения экспресс-оценки экологического риска с использованием распределения чувствительности видов. Аппроксимация этих результатов кумулятивной кривой логнормального распределения дает возможность предсказать, какая доля видов p % от общего их числа исчезнет из состава сообщества при конкретном значении HC показателя загрязнения водоема (концентрации токсиканта). В качестве примера нами рассчитаны критические значения восьми показателей качества воды для заданных уровней экологического риска (15 %, 30 % и 50 %).

Библиография

- Безель В. С., Большаков В. Н., Воробейчик Е. Л. Популяционная экотоксикология. М.: Наука, 1994. 79 с.
- Воробейчик Е. Л., Садыков О. Ф., Фарафонов М. Г. Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем (локальный уровень). Екатеринбург: Наука, 1994. 280 с.
- Гелашвили Д. Б., Безель В. С., Романова Е. Б., Безруков М. Е., Силкин А. А., Нижегородцев А. А. Принципы и методы экологической токсикологии. Н. Новгород: Нижегородский госуниверситет, 2016. 703 с.
- Головатюк Л. В., Зинченко Т. Д., Шитиков В. К. Географические аспекты пространственного распре-

- деления биоразнообразия донных сообществ Среднего и Нижнего Поволжья // Принципы экологии. 2021. № 2. С. 38–53.
- Зинченко Т. Д. Эколого-фаунистическая характеристика хирономид (Diptera, Chironomidae) малых рек бассейна Средней и Нижней Волги (Атлас) . Тольятти: Кассандра, 2011. 258 с.
- Шитиков В. К. Экоотоксикология и статистическое моделирование эффекта с использованием R . 2016. Электронная книга. 149 с. URL: <https://stok1946.blogspot.com/p/blog-page.html> (дата обращения: 12.10.2020).
- Aldenberg T., Jaworska J. S. Uncertainty of the hazardous concentration and fraction affected for normal species sensitivity distributions // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2000. Vol. 46. P. 1–18.
- Golovatyuk L. V., Shitkov V. K., Zinchenko T. D. Estimation of the Zonal Distribution of Species of Bottom Communities in Lowland Rivers of the Middle and Lower Volga Basin // *Biology Bulletin*. 2018. Vol. 45 (10). P. 1262–1268.
- Newman M. C., Ownby D. R., Mezin L. C. A. et al. Applying species-sensitivity distributions in ecological risk assessment: assumptions of distribution type and sufficient numbers of species // *Environ. Toxicol. Chem.* 2000. Vol. 19, No 2. P. 508–515.
- Posthuma L., Suter G. W. H., Traas T. P. *Species Sensitivity Distributions in Ecotoxicology*. CRC Press, 2001. 616 p.
- Smetanova S., Blaha L., Liess M., Schafer R. B., Beketov M. A. Do predictions from Species Sensitivity Distributions match with field data? // *Environ Pollut.* 2014. Vol. 189. P. 126–133.
- Solomon K. R., Brock T. C. M., De Zwart D. et al., eds. *Extrapolation Practice for ecotoxicological effect characterization of chemicals*. SETAC Press & CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2008. 410 p.
- Spurgeon D., Lahive E., Robinson A., Short S., Kille P. Species Sensitivity to Toxic Substances: Evolution, Ecology and Applications // *Front. Environ. Sci.* 2020. 8:588380. P. 1–25. DOI: 10.3389/fenvs.2020.588380.
- Verdonck F. A. M., Aldenberg T., Jaworska J., Vanrolleghem P. A. Limitations of current risk characterization methods in probabilistic environmental risk assessment // *Environ. Toxicol. Chem.* 2003. Vol. 22. P. 2209–2213.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 15-04-03341 и в рамках государственного задания по теме № АААА-А17-117112040039-7 «Экологические закономерности структурно-функциональной организации, ресурсного потенциала и устойчивого функционирования экосистем Волжского бассейна» (направление 51 «Экология организмов и сообществ»). Благодарим рецензентов статьи, давших точные и полезные замечания.

ASSESSMENT OF CRITICAL LEVELS OF POLLUTION OF WATER BODIES BASED ON THE STATISTICAL DISTRIBUTION OF THE OCCURRENCE OF MACROZOOBENTHOS SPECIES

SHITIKOV
Vladimir Kirillovitch

D.Sc., Samara Federal Research Scientific Center, Institute of Ecology of the Volga River Basin of the Russian Academy of Science, stok1946@gmail.com

ZINCHENKO
Tatyana Dmitrievna

D.Sc., Samara Federal Research Scientific Center, Institute of Ecology of the Volga River Basin of the Russian Academy of Science, zinchenko.tdz@yandex.ru

GOLOVATYUK
Larisa Vladimirovna

PhD, Samara Federal Research Scientific Center, Institute of Ecology of the Volga River Basin of the Russian Academy of Science, gollarisa@mail.ru

Keywords:
bioindication
environmental risk
technogenic pollution
water bodies
macrozoobenthos
Species Sensitivity
Distribution

Summary: A methodology for substantiating the environmental risk of technogenic pollution of water bodies is described based on the results of bioindication using macrozoobenthos communities. At the first stage, on the basis of statistical methods, the estimation of extreme values of hydrochemical factors, at which the occurrence of each species is unlikely, was carried out. Based on these data, the statistical distribution of the species sensitivity (SSD) was simulated. To illustrate the methodology, the results of a long-term hydrobiological survey of macrozoobenthos on 102 small and medium-sized rivers in the Middle and Lower Volga basin were used. The threshold values of eight indicators of river water pollution providing a preset permissible probability of environmental risk are given.

Reviewer: N. A. Berezina

Reviewer: N. M. Kalinkina

Received on: 22 June 2022

Published on: 29 September 2022

References

- Aldenberg T., Jaworska J. S. Uncertainty of the hazardous concentration and fraction affected for normal species sensitivity distributions, *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2000. Vol. 46. P. 1–18.
- Bezel' V. S. Bol'shakov V. N. Vorobeychik E. L. *Population ecotoxicology*. M.: Nauka, 1994. 79 p.
- Gelashvili D. B. Bezel' V. S. Romanova E. B. Bezrukov M. E. Silkin A. A. Nizhegorodcev A. A. *Principles and methods of environmental toxicology*. N. Novgorod: Nizhegorodskiy gosuniversitet, 2016. 703 p.
- Golovatyuk L. V. Zinchenko T. D. Shitikov V. K. Gejgrafical aspects of spatial distribution of biodiversity in benthic communities in the Middle and Lower Volga region, *Principy ekologii*. 2021. No. 2. P. 38–53.
- Golovatyuk L. V., Shitikov V. K., Zinchenko T. D. Estmaton of the Zonal Distributon of Species of Botom Communites in Lowland Rivers of the Middle and Lower Volga Basin, *Biology Bulletn*. 2018. Vol. 45 (10). R. 1262–1268.
- Newman M. C., Ownby D. R., Mezin L. C. A. et al. Applying species-sensitivity distributions in ecological risk assessment: assumptions of distribution type and sufficient numbers of species, *Environ. Toxicol. Chem.* 2000. Vol. 19, No 2. P. 508–515.
- Posthuma L., Suter G. W. H., Traas T. P. *Species Sensitivity Distributions in Ecotoxicology*. CRC Press, 2001. 616 p.
- Shitikov V. K. *Ecotoxicology and statistical modeling of the effect using R*. 2016. Elektronnaya kniga. 149 p. URL: <https://stok1946.blogspot.com/p/blog-page.html> (data obrascheniya: 12.10.2020).
- Smetanova S., Blaha L., Liess M., Schafer R. B., Beketov M. A. Do predictions from Species Sensitivity Distributions match with field data?, *Environ Pollut*. 2014. Vol. 189. P. 126–133.
- Solomon K. R., Brock T. C. M., De Zwart D. et al., eds. *Extrapolation Practice for ecotoxicological effect*

- characterization of chemicals. SETAC Press & CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2008. 410 r.
- Spurgeon D., Lahive E., Robinson A., Short S., Kille P. Species Sensitivity to Toxic Substances: Evolution, Ecology and Applications, *Front. Environ. Sci.* 2020. 8:588380. P. 1–25. DOI: 10.3389/fenvs.2020.588380.
- Verdonck F. A. M., Aldenberg T., Jaworska J., Vanrolleghem P. A. Limitations of current risk characterization methods in probabilistic environmental risk assessment, *Environ. Toxicol. Chem.* 2003. Vol. 22. P. 2209–2213.
- Vopobeychik E. L. Sadykov O. F. Farafontov M. G. Ecological regulation of technogenic pollution of terrestrial ecosystems (local level). Ekaterinburg: Nauka, 1994. 280 p.
- Zinchenko T. D. Ecological and faunal characteristics of chironomids (Diptera, Chironomidae) of small rivers of the Middle and Lower Volga basin (Atlas). Tol'yatti: Kassandra, 2011. 258 p.