

ГИДРОБИОЛОГИЯ

УДК 504.4.054

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТОКСИКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК В ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДНОГО ОБЪЕКТА

Н. В. Зуева, А. В. Козлова, А. Ю. Куличенко

Российский государственный гидрометеорологический университет,
Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются этапы построения интегрального показателя экологического состояния водных экосистем на основе моделей-классификаций. В качестве одного из приоритетных признаков такой классификации используются характеристики острого токсического действия поверхностных вод для тест-объектов различного таксономического уровня (*Daphnia magna* Straus, *Chlorella vulgaris* Beijer, *Paramecium caudatum* Ehrenberg). Оценка экологического состояния выполняется на основе метода сводных показателей. Приоритетными признаками выступают удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ), индекс сапробности Пантле – Букка в модификации Сладечека (по фитопланктону) и токсикологические характеристики. Биотестовые показатели, включенные в работу: смертность *Daphnia magna* за 48 часов, изменение оптической плотности *Chlorella vulgaris* за 22 часа; индекс токсичности для *Paramecium caudatum*. Значения признаков, включенных в модель-классификацию, отнесены к пяти категориям экологического состояния: катастрофическое, кризисное, неудовлетворительное, удовлетворительное и благополучное. Возможность использования токсикологических характеристик в интегральной оценке экологического состояния водных экосистем наряду с гидрохимическими и гидробиологическими показателями апробируется на примере озер Псковской области и бухты Петрокрепость Ладожского озера. В результате оценки экологического состояния по разработанной модели-классификации состояние оз. Большой Иван Псковской области признано благополучным, остальные водные объекты оценены как имеющие удовлетворительное состояние. Экологическое состояние бухты Петрокрепость Ладожского озера в 2013 г. находилось на границе категорий «удовлетворительное» – «неудовлетворительное».

К л ю ч е в ы е с л о в а: озеро; экологическое состояние; интегральная оценка; биотестирование; сапробность; УКИЗВ; острое токсическое действие; Ладожское озеро; бухта Петрокрепость; Псковская область.

N. V. Zueva, A. V. Kozlova, A. Yu. Kulichenko. USE OF TOXICOLOGICAL CHARACTERISTICS IN THE INTEGRATED ASSESSMENT OF THE WATER BODIES ECOLOGICAL STATUS

This paper presents the stages of constructing the integral index of water bodies' ecological status. The characteristics of surface water acute toxic effects on test objects of different taxonomic levels (*Daphnia magna* Straus, *Chlorella vulgaris* Beijer, *Paramecium caudatum* Ehrenberg) are used as one of the priority indicators for the classification. The ecological status assessment is based on the composite indices method. The specific combinatory water pollution index (SCWPI), the Pantle-Buck saprobity index in the Sladeczek modification (for phytoplankton) and toxicological characteristics are the priority features. The biotest indices in this study were *Daphnia magna* death rate, *Chlorella vulgaris* optical density, *Paramecium caudatum* toxicity index. Features in the classification model received values belonging to five ecological status categories: catastrophic, crisis, unsatisfactory, satisfactory, sound. The feasibility of using toxicological characteristics for integral assessment of the ecological status of water ecosystems along with hydrochemical and hydrobiological characteristics is tested for lakes in the Pskov Region and Petrokrepost Bay of Lake Ladoga. As the result of an ecological status assessment, the condition of Lake Bolshoy Ivan in Pskov Region was qualified as sound, and the rest were assessed as having satisfactory conditions. The ecological status of Petrokrepost Bay of Lake Ladoga (in 2013) was found to be marginal between "satisfactory" and "unsatisfactory".

Key words: lake; ecological status; integral assessment; biological testing; saprobity; SCWPI; acute toxic effects; Lake Ladoga; Petrokrepost Bay; Pskov Region.

Введение

Оценка экологического состояния водного объекта должна быть выполнена с учетом как абиотической составляющей экосистемы, так и характеристик биоты. Так, экологическая оценка (по В. В. Дмитриеву) – параметрическое определение состояний природной среды, обеспечивающих существование сообществ живых организмов, характерных для этих состояний в условиях естественного или антропогенного режимов их развития. При этом исследуются как свойства абиотической среды, так и параметры структуры и функционирования экосистем природного объекта в естественных и измененных условиях [Дмитриев, 2000].

Интегральную оценку, которая предполагает объединение разнородных многокритериальных оценок в одно целое, удобно выполнять на основе метода сводных показателей. Первым этапом такой оценки является выбор исходной классификации экологического состояния. В нее должны входить ряд приоритетных признаков, которые репрезентативно отражают как абиотическую, так и биотическую составляющие системы [Дмитриев и др., 1997].

Абиотическую составляющую водных экосистем принято оценивать с помощью гидрохимических показателей: концентраций отдельных элементов или соединений и индексов, получаемых на их основе. В настоящее время очевидна недостаточность определения

состояния водных экосистем с помощью одних лишь гидрохимических методов. Кроме того, оценка состояния вод на основе системы предельно допустимых концентраций (ПДК) вредных (загрязняющих) веществ удобна, но несовершенна и регулярно подвергается критике [Дмитриев, 1994; Жмур, 1999; Черкашин, 2001; Шитиков и др., 2003; Лозовик, Платонов, 2005].

В связи с этим необходимо совместно с гидрохимическими использовать биологические методы оценки. Данные методы позволяют охарактеризовать водный объект по совокупности действия всех веществ и предсказывать изменения, ожидающие биоту при данном уровне загрязнения [Крайнюкова, 2009]. Стоит отметить, что принятая в странах Европейского сообщества Водная рамочная директива [WFD..., 2000] определяет приоритет биологических компонентов экосистемы при оценке ее состояния.

Биоиндикационные методы традиционно применяются в экологических исследованиях водных объектов, причем для этого используются разнообразные группы организмов. Наиболее часто и успешно применяются методы определения состояния по фитопланктону, зоопланктону и макрозообентосу [Макрушин, 1974; Баканов, 2000; Баринаова, 2006].

Методы биотестирования, несмотря на широкое использование при контроле качества вод различного генеза [Р 52.24.566..., 1994], в комплексных экологических исследованиях

применяются пока реже. Хотя их результаты дают обобщенную характеристику качества среды [Брагинский, 1985; Черкашин, 2001; Крайнюкова, 2009], однозначная интерпретация результатов биотестирования бывает затруднена в связи с отсутствием стандартизированных методических приемов.

Токсичность является интегральной характеристикой качества воды, обусловленной проявлением негативных для водной биоты последствий свойств химических веществ, присутствующих в испытываемой воде [Р 52.24.566..., 1994; Бакаева, Никаноров, 2006]. Методики, базирующиеся на биологическом критерии, учитывают действие токсических веществ на физиолого-биохимические процессы у водных животных, их устойчивость к токсикантам, влияние качества водной среды на различные формы поведения гидробионтов [Строганов, Колосова, 1971; Флеров, 1989].

Классификация пресноводных экосистем по уровню токсического загрязнения по данным биотестирования на дафниях была предложена Л. П. Брагинским [1985]. Включение эколого-токсикологических показателей в комплексную экологическую классификацию качества поверхностных вод суши было выполнено О. П. Оксиком и В. Н. Жукинским с соавторами одними из первых [Оксик и др., 1993]. В Гидрохимическом институте разработаны рекомендации [Р 52.24.763..., 2012] по использованию химико-биологических показателей, включая биотестовые, для оценки состояния пресноводных экосистем. В своих работах Е. Н. Бакаева также подчеркивает, что токсикологические характеристики являются индикаторами общего состояния экосистемы, ее экологического благополучия [Бакаева, 2015; Бакаева, Игнатова, 2015]. Использование токсикологических характеристик в качестве одного из признаков благополучной водной экосистемы приводится в работе Е. А. Примака и Н. В. Зуевой [2016].

На основе комплекса физико-химических, гидробиологических и биотестовых показателей разработан подход для выявления состояния крайней степени экологического неблагополучия водохранилищ [Хоружая, Минина, 2017]. Оценка экологического состояния водных объектов в виде совместного анализа результатов биотестирования и физико-химических данных выполнена для рек Санкт-Петербурга [Кулангиева, Гальцова, 2002; Гальцова и др., 2010], притоков Рыбинского водохранилища [Тихановская, Машихина, 2016], акватории Магнитогорского водохранилища [Грибовский и др., 2009] и других водоемов.

Таким образом, при интегральной оценке экологического состояния водоема в качестве одного из приоритетных признаков наряду с общепринятыми гидрохимическими и гидробиологическими показателями целесообразно использовать токсикологические характеристики.

Цель работы – создание модели-классификации для использования характеристик острой токсичности поверхностных вод в интегральной оценке экологического состояния водных объектов.

Материалы и методы

Метод сводных показателей

Интегральная оценка экологического состояния водных объектов выполнялась на основе метода сводных показателей [Хованов, 1996; Дмитриев и др., 1997]. В его основе лежит построение авторской модели-классификации экологического состояния водного объекта.

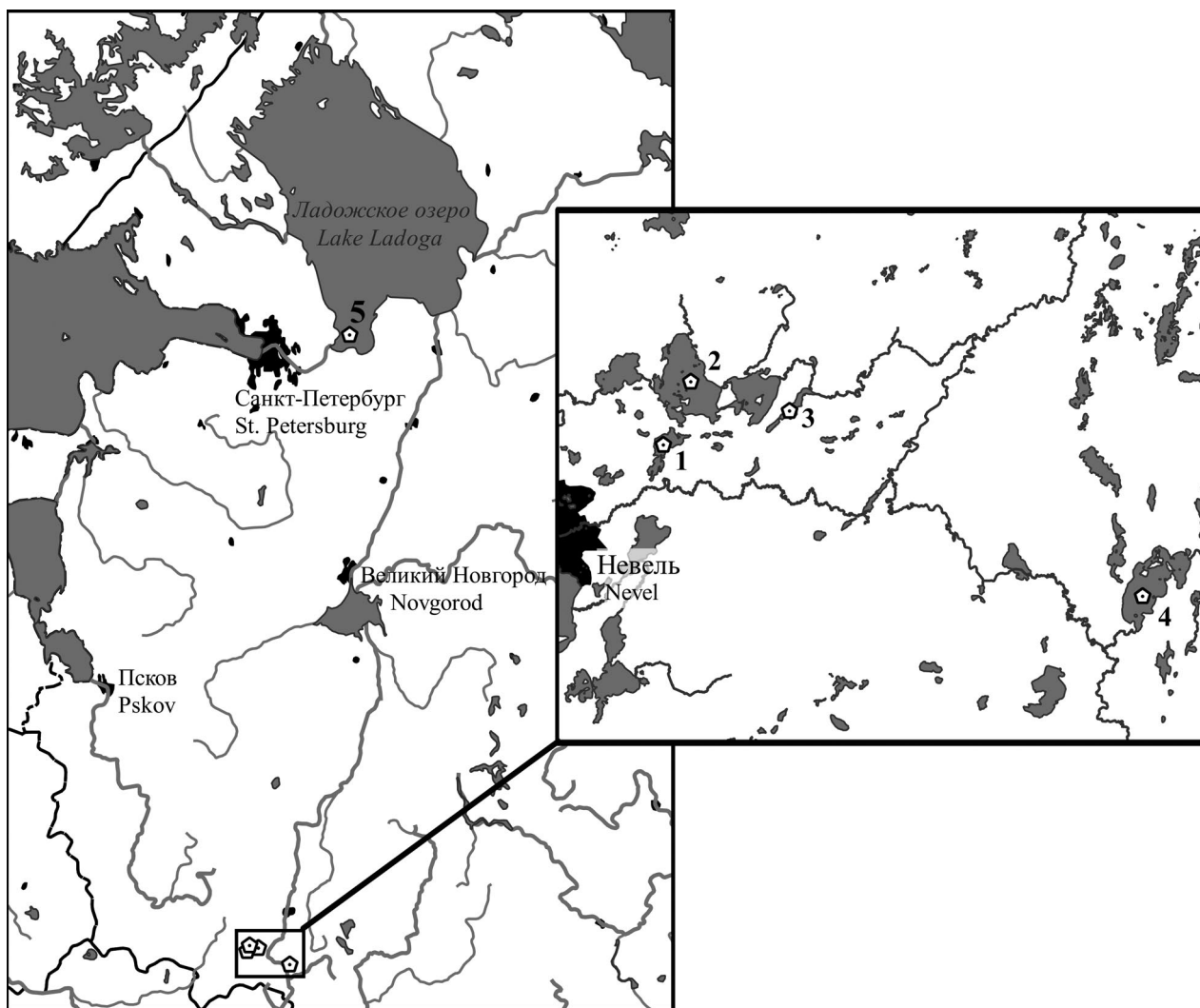
Вначале были выбраны приоритетные признаки, по которым проводилась классификация экологического состояния. Далее в классификации вводились левые и правые границы для всех исходных характеристик и проводилась процедура нормирования.

Критерии, входящие в исходную классификацию, можно разделить на два типа. К первому типу относятся характеристики, увеличение значений которых показывает ухудшение экологического состояния водотока. Ко второму типу отнесены критерии, увеличение значений которых свидетельствует об улучшении состояния. При этом наилучшему экологическому состоянию по каждому оценочному критерию соответствует значение, равное 0, а наихудшему – 1. Такое преобразование выполнялось по формуле (1) для критериев первого типа и по формуле (2) – для второго типа.

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 0, & \text{при } x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{x_i - \min_i}{\max_i - \min_i} \right), & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 1, & \text{при } x_i > \max_i \end{cases} \quad (1)$$

$$q_i = q_i(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } x_i \leq \min_i, \\ \left(\frac{\max_i - x_i}{\max_i - \min_i} \right), & \text{при } (\min_i < x_i \leq \max_i), \\ 0, & \text{при } x_i > \max_i. \end{cases} \quad (2)$$

В формулах: q_i – нормированное значение параметра; x_i – текущее значение критерия;



Исследованные водные объекты:

1 – оз. Черетвицы, 2 – оз. Большой Иван, 3 – оз. Балаздынь, 4 – оз. Урицкое, 5 – бухта Петрокрепость Ладожского озера

Studied water bodies:

1 – Lake Cheretvitsy, 2 – Lake Bolshoi Ivan, 3 – Lake Balazdyn, 4 – Lake Uritskoe, 5 – Petrokrepost Bay of Lake Ladoga

\max_i (\min_i) – максимальное (минимальное) значение критерия.

Таким образом, исходные параметры в различных шкалах измерения приводились к единой безразмерной шкале, после чего над их значениями стало возможно производить математические действия с целью получения интегрального показателя.

На следующем этапе по формуле (3) для левой и правой границы каждого класса рассчитывалось значение интегрального показателя Q .

$$Q_i = \sum_{j=1}^n q_j \times p_j, \quad (3)$$

где n – число критериев оценивания; q_j – нормированное значение параметров, p_j – вес параметра.

При построении этого показателя можно учитывать не только показатели q_j , но и их значимость, определяемую весовыми коэффициентами p_j . Тогда сумма весовых коэффициентов должна равняться 1 ($0 \leq p_j \leq 1$). В данной работе строилась модель-классификация на основе предположения, что все три выбранных параметра экологической оценки (гидрохимический, гидробиологический и токсикологический) равновесны. Поэтому расчет интегрального показателя сводился к осреднению нормированных значений. В результате выполнения этого этапа была получена шкала интегрального показателя.

Апробация на натуральных данных

В качестве исходных данных выступают гидрохимические показатели, гидробиологи-

ческие, в том числе токсикологические, характеристики ряда озер Псковской области и центральной части бухты Петрокрепость Ладожского озера (рис.).

Озера Псковской области – Балаздынь, Большой Иван, Урицкое и Черетвицы – расположены в ее южной части. Данные водоемы являются мелководными и проточными. Озера Балаздынь, Большой Иван и Урицкое в основном имеют рекреационное значение. В озеро Черетвицы осуществляется сброс после биологической очистки производственных и хозяйственно-бытовых сточных вод, которые образуются в результате деятельности загородного оздоровительного лагеря.

Бухта Петрокрепость – крупный мелководный залив в южной части Ладожского озера. Она подвержена разноплановому антропогенному воздействию. Здесь проходит основной судоходный фарватер Волго-Балтийского пути, впадают загрязненные притоки и располагаются точечные источники загрязнения, сбрасывающие сточные воды непосредственно в Ладожское озеро [Кондратьев, Поздняков, 2013]. Прибрежная зона бухты характеризуется более высоким трофическим статусом и уровнем загрязнения [Игнатьева и др., 2013].

Для оценки экологического состояния центральной части бухты Петрокрепость Ладожского озера используются литературные данные за 2012 и 2013 гг. [Доклад..., 2014]: УКИЗВ, индекс токсичности, полученный для инфузорий *Paramecium caudatum* Ehrenberg (время тест-реакции – 30 мин.), а также индекс сапробности, рассчитанный по индикаторным видам фитопланктона.

Данные о качестве вод озер Псковской области в 2013 г. предоставлены ГП ПО «Центр детского отдыха и оздоровления». Для комплексной оценки степени загрязненности водных объектов по предоставленным гидрохимическим показателям для озер Псковской области нами был рассчитан удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ). Для расчета согласно методике [РД 52.24.643..., 2003] использовались четыре значения концентраций по каждому загрязняющему веществу за период 2013 года. В число показателей входили: биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК₅), химическое потребление кислорода (ХПК), сухой остаток, содержание взвешенных веществ, нефтепродуктов, азота аммонийного, азота нитритов, азота нитратов, фосфора общего, железа общего, сульфат-ион, хлорид-ион, растворенный кислород, анионные поверхностно-активные вещества (АПАВ).

Из гидробиологических показателей для оценки экологического состояния исследуемых озер Псковской области использовался индекс сапробности Пантле и Букка в модификации Сладечека, рассчитанный по индикаторным видам фитопланктона, полученным в период с мая по сентябрь 2013 г. Также использовались результаты биотестирования воды за тот же период. В качестве тест-объектов для оценки токсического действия применялись ракообразные дафния магна (*Daphnia magna* Straus), одноклеточные зеленые водоросли из класса протококковых – хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) [ПНД..., 2014а, б]. Продолжительность тест-реакции для ракообразных составляла 48 часов, для водорослей – 22 часа.

По мнению многих авторов, ни один из отдельно взятых организмов не может служить универсальным тест-объектом, чувствительным к веществам различной химической природы. Следовательно, для гарантированного выявления токсического эффекта среды должен использоваться набор биотестов [Брагинский и др., 1979; Лесников, 1983; Филенко, 1989; Бакаева, 2015]. Согласно нормативным документам, состав биотестов (методик) также должен включать тест-объекты разного трофического и систематического уровня. Реакция тест-объектов, обладающих различной чувствительностью к одному и тому же воздействию, позволяет получить более объективную оценку токсического загрязнения [Р 52.24.690..., 2006].

В данной работе для построения классификации по токсикологическим характеристикам выбраны организмы разных таксономических уровней: ракообразные (*Daphnia magna*), одноклеточные зеленые водоросли (*Chlorella vulgaris*) и простейшие – инфузории (*Paramecium caudatum*). Указанные тест-объекты являются представителями основных сообществ гидробионтов и традиционно применяются в природоохранных нормативных документах и общепринятых методиках, включенных в Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений [ПНД..., 2014а, б; ФР..., 2015].

Результаты и обсуждение

Осуществление оценки экологического состояния водного объекта методом сводных показателей требует выбора ряда приоритетных признаков. По ним проводится классификация экологического состояния водного объекта. В данной работе выбрано три таких признака: гидрохимический,

Таблица 1. Модель-классификация экологического состояния водного объекта

Table 1. Classification scheme of water body ecological status

Признак Index	Категории экологического состояния Class of ecological status					
	Катастрофическое Very bad V	Кризисное Bad IV	Неудовлетворительное Unsatisfactory III	Удовлетворительное Satisfactory II	Благополучное Good I	
1 УКИЗВ SCWPI Класс качества Class of quality	16,0–11,1 экстремально грязная extremely polluted	11,0–4,1 грязная polluted	4,0–2,1 загрязненная contaminated	2,0–1,1 слабозагрязненная moderately contaminated	1,0–0,0 условно чистая conditionally clean	
2 S Класс качества Class of quality	6,00–4,01 очень грязные heavily polluted	4,00–3,51 грязные polluted	3,50–2,51 загрязненные contaminated	2,50–1,51 умеренно загрязненные moderately contaminated	1,50–0,00 очень чистые и чистые very clean and clean	
3 A, % наличие т. д. toxic effects	100–91 о. т. д. a. t. e.	90–50 о. т. д. a. t. e.	49–11 т. д. t. e.	10–6 не оказывает о. т. д. no a. t. e.	5–0 не оказывает о. т. д. no a. t. e.	
	J, % наличие т. д. toxic effects	100–91 –100–(–91) т. д. t. e.	90–71 –90–(–61) т. д. t. e.	70–30 –60–(–20) т. д. t. e.	29–16 –19–(–11) не оказывает т. д. no t. e.	15–0 –10–0 не оказывает т. д. no t. e.
	T степень токсичности toxicity level	1,00–0,91 высокая high	0,90–0,71 высокая high	0,70–0,41 умеренная medium	0,40–0,21 допустимая permissible	0,20–0,00 допустимая permissible

Примечание. Здесь и в табл. 3: УКИЗВ – удельный комбинаторный индекс загрязненности воды; S – индекс сапробности Пантле – Букка в модификации Сладечека (по фитопланктону); A – смертность *Daphnia magna* в 48-час. опыте, J – изменение оптической плотности *Chlorella vulgaris*; T – индекс токсичности для *Paramecium caudatum*; т. д. – токсическое действие; о. т. д. – острое токсическое действие.

Note. Here and in Table 3: SCWPI – specific combinatory water pollution index, S – Pantle-Buck saprobity index in the Sladeczek modification (for phytoplankton); A – *Daphnia magna* death rate (24 h), J – *Chlorella vulgaris* optical density; T – *Paramecium caudatum* toxicity index; t. e. – toxic effects; a. t. e. – acute toxic effects.

гидробиологический-биоиндикационный и биотестовый (токсикологический).

Это, во-первых, удельный комбинаторный индекс загрязненности воды (УКИЗВ), введенный в 2002 г. [РД 52.24.643..., 2003]. Используется для комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям.

Во-вторых, индекс сапробности Пантле и Букка в модификации Сладечека (S) [Руководство..., 1992]. Данный метод широко применяется в оценке загрязнения природных вод по фито-, зоопланктону и зообентосу. В предложенной модели-классификации используется сапробность, рассчитанная по индикаторным видам фитопланктона.

Третий признак – токсикологический, в него включены: острая токсичность, определяемая по изменению смертности дафний *Daphnia magna* в тестируемой пробе за 48 часов (A), токсичность, определяемая по изменению оптической плотности тест-объекта *Chlorella vulgaris* за 22 часа

(J), а также индекс токсичности для *Paramecium caudatum* (T) [ПНД..., 2014а, б; ФР..., 2015].

Выделение диапазонов значений категорий в модели-классификации

Предложенная классификация (табл. 1) предусматривает пять категорий состояния водной экосистемы: катастрофическое, кризисное, неудовлетворительное, удовлетворительное и благополучное.

Классификация по значению УКИЗВ проводилась в соответствии с методикой [РД 52.24.643..., 2003]. Таким образом, каждому из пяти классов качества вод, выделенных по значению УКИЗВ, соответствует своя категория экологического состояния водного объекта (табл. 1).

Авторы рекомендаций [Р 52.24.763..., 2012] также относят пятый класс качества вод по УКИЗВ к наихудшей категории «экологического бедствия», а четвертый – к «чрезвычайной

экологической ситуации». Однако относительно удовлетворительным состоянием в рекомендациях характеризуются лишь воды первого класса.

Распределение значений индекса сапробности по указанным категориям проводилось следующим образом. При оценке водоема по индексу Пантле – Букка предусматривается шесть классов качества воды [ГОСТ..., 1982; Руководство..., 1992]. Для того чтобы получить шкалу для пяти категорий экологического состояния из этой шестибальной шкалы, к «благополучному» состоянию были отнесены воды с сапробностью, соответствующей классам «очень чистые» и «чистые», то есть ксено- и олигосапробные воды.

Описанное распределение хорошо согласуется с классификацией качества поверхностных вод суши по В. Д. Романенко с соавторами [1990], когда ксеносапробные и олигосапробные воды относятся соответственно к классам предельно чистых и чистых вод, β -мезосапробные – удовлетворительной чистоты, α -мезосапробные – загрязненные, а полисапробные входят в класс «грязные».

Отметим, что в рекомендациях Гидрохимического института [Р 52.24.763..., 2012] лишь ксено- и олигосапробные воды отнесены к наилучшей категории «относительно удовлетворительное состояние», в отличие от классификации Минприроды [Методика..., 1992], где в такую же категорию входит и β -мезосапробная зона. В предложенной классификации (табл. 1) β -мезосапробные воды также отнесены к категории удовлетворительного экологического состояния, вследствие того, что такие значения индекса Пантле – Букка могут соответствовать природным водам, не испытывающим антропогенного загрязнения. Так, монография Л. П. Рыжкова [1999] позволяет судить о характеристиках незагрязненных водоемов Северного Приладожья. Сапробность, оцененная по фитопланктону, в олиготрофных и олигомезотрофных озерах этой территории изменяется в пределах 0,88–1,91.

Токсикологические характеристики, включенные в модель-классификацию, – результаты совместных биотестов для организмов различного таксономического уровня. По мнению многих авторов, это необходимо для обеспечения валидности результатов [Брагинский и др., 1979; Лесников, 1983; Филенко, 1989; Бакаева, 2015]. Учитывая, что данные трех параллельных токсикологических опытов на различных тест-объектах – редкость, при недостатке информации предложенная классификация может быть ограничена признаками, полученными

с использованием меньшего числа тест-объектов. При построении интегрального индекса для расчетов должна быть выбрана одна токсикологическая характеристика. Используется биотестовый показатель, демонстрирующий большой уровень токсичности.

В методике по определению токсичности с использованием дафний [ПНД..., 2014б] выделяют области, когда тестируемая проба в 48-часовом опыте не оказывает острого токсического действия (при $A \leq 10\%$) и когда наблюдается острое токсическое действие (при $A \geq 50\%$). Более подробная классификация пресноводных экосистем по уровню токсического загрязнения по данным биотестирования на дафниях была предложена Л. П. Брагинским [1985]. Для пяти классов вод автор выделяет следующие уровни токсического загрязнения: олиготоксичность, β -мезотоксичность, α -мезотоксичность, политоксичность и гипертоксичность.

На основе указанных в методике диапазонов и классификации Л. П. Брагинского предложенная нами модель-классификация с использованием дафний строится следующим образом. К категориям экологического состояния «благополучное» и «удовлетворительное» (табл. 1) относят воды, для которых смертность дафний составляет менее 10%. По шкале Брагинского данному диапазону соответствует олиготоксичность. Граница между 1-й и 2-й категориями выделена в значительной мере условно, делением области пополам.

Следующая, 3-я категория «неудовлетворительное состояние» (более 10, но менее 50% смертности) выделена с учетом области отсутствия острого токсического действия согласно методике. По классификации [Брагинский, 1985] в нее входят области β - и α -мезотоксичности.

Для остальных двух категорий – кризисного и катастрофического состояния – смертность дафний в тестируемой пробе будет находиться в диапазоне от 50 до 100%, где 50% и более – критерий острой токсичности [ПНД..., 2014а]. По классификации Брагинского это зоны политоксичности и гипертоксичности. Выделение четких границ в этой области затруднительно. Однако можно считать, что «мгновенная или в течение 1–2 часов» [Брагинский, 1985] гибель дафний при гипертоксичности будет соответствовать 100% смертности в остром опыте. Так же как и 100% смертность в течение менее 1 часа, отнесенная по классификации [Оксиук и др., 1993] к уровню «чрезвычайно токсичная». Поэтому данный диапазон (> 90%) был отнесен к пятой категории – катастрофическое экологическое состояние.

Таблица 2. Значения интегрального индекса экологического состояния водного объекта (Q) при использовании разных токсикологических характеристик

Table 2. Integral index of the ecological status of a water body (Q) when using different toxicological characteristics

Индекс Index	Катастрофическое Very bad	Кризисное Bad	Неудовлетворительное Unsatisfactory	Удовлетворительное Satisfactory	Благополучное Good
Q _A	1–0,75	0,75–0,44	0,44–0,21	0,21–0,12	0,12–0
Q _{J⁺}	1–0,75	0,75–0,51	0,51–0,28	0,28–0,15	0,15–0
Q _{J⁻}	1–0,75	0,75–0,48	0,48–0,24	0,24–0,14	0,14–0
Q _T	1–0,75	0,75–0,51	0,51–0,31	0,31–0,17	0,17–0

Примечание. Нижний индекс Q: A – смертность *Daphnia magna*, J⁺ – изменение оптической плотности *Chlorella vulgaris* (положительная часть диапазона); J⁻ – изменение оптической плотности *Chlorella vulgaris* (отрицательная часть диапазона); T – индекс токсичности для *Paramecium caudatum*.

Note. Subscript of Q: A – *Daphnia magna* death rate, J⁺ – *Chlorella vulgaris* optical density (positive part of the value range); J⁻ – *Chlorella vulgaris* optical density (negative part of the value range); T – *Paramecium caudatum* toxicity index.

В случае определения токсичности по изменению оптической плотности тест-объекта *Chlorella vulgaris* теоретически возможно изменение характеристики в границах от –100 до 100 %. В методике [ПНД..., 2014а] критерием токсичности пробы воды является снижение средней величины оптической плотности по сравнению с контрольным вариантом на 20 % и более в случае подавления роста тест-культуры или ее повышение на 30 % и более при стимуляции ростовых процессов.

Таким образом, водам, не оказывающим острого токсического действия, будет соответствовать отрезок от –19 до 29 %, то есть наилучшее экологическое состояние соответствует примерно середине диапазона. Поэтому для включения в модель-классификацию весь диапазон был разделен на две части: положительную и отрицательную. К благополучному состоянию отнесены отрезки от 0 до 15 % и от –10 до 0 %. Остальная часть значений в области без острого токсического действия вошла в категорию удовлетворительного экологического состояния.

Так же как в модели-классификации с использованием дафний, к катастрофическому состоянию были отнесены значения, близкие к ±100 % (с абсолютными значениями > 90 %), а оставшаяся часть диапазона поровну поделена между категориями «кризисное» и «неудовлетворительное».

По величине индекса токсичности, полученного для *Paramecium caudatum*, воды делятся по степени их токсичности на три группы: допустимая степень токсичности (0,00 < T ≤ 0,40), умеренная (0,41 < T ≤ 0,70) и высокая (T > 0,71) [ФР..., 2015].

Исходя из этого, в разработанной модели-классификации предполагается, что допустимая токсичность (0–0,40) присуща категориям

«благополучное» и «удовлетворительное» экологическое состояние. Умеренная токсичность отнесена к неудовлетворительной градации, а высокая – к кризисному и катастрофическому экологическому состоянию.

В итоге получена модель-классификация, в которую вошли три токсикологические характеристики. Далее, как было описано выше, проводилась процедура нормирования исходных значений с помощью нормирующих функций и расчет границ категорий интегрального показателя Q (табл. 2).

Интегральная оценка экологического состояния водоемов

Полученная нами классификация для оценки экологического состояния была апробирована в шести вариантах (табл. 3) – на четырех озерах Псковской области, а также в центральной части бухты Петрокрепость Ладожского озера, где при апробации использовались данные за 2012 и 2013 гг.

Для озер Псковской области были известны две токсикологические характеристики (табл. 3). Из них в оценке, наряду с гидрохимическими и гидробиологическими показателями, использовалось изменение оптической плотности *Chlorella vulgaris*, так как по этому токсикологическому показателю получена оценка хуже, чем по второму (смертность *Daphnia magna*). Таким образом, рассчитывался интегральный показатель Q_{J⁺} (табл. 4). Для бухты Петрокрепость в оценке использовался индекс токсичности для *Paramecium caudatum*, соответственно, рассчитывался интегральный индекс Q_T. Ранжированные результаты оценки экологического состояния исследованных водных объектов по предложенному интегральному показателю представлены в таблице 4.

Таблица 3. Исходные данные для оценки экологического состояния на примере озер северо-запада России
 Table 3. Initial data for assessing the ecological status of the lakes in the North-West of Russia

Водный объект Water body	УКИЗВ SCWPI	S	A, %	J, %	T
оз. Балаздынъ Lake Balazdyn	0,55	2,05	0	15,0	-
оз. Большой Иван Lake Bolshoi Ivan	0,27	2,10	0	6,0	-
оз. Черетвицы Lake Cheretvitsy	0,68	2,20	0	8,0	-
оз. Урицкое Lake Uritskoe	0,94	2,14	0	18,0	-
бух. Петрокрепость 2012 г. Petrokrepost Bay (2012)	1,47	2,06	-	-	0,26
бух. Петрокрепость 2013 г. Petrokrepost Bay (2013)	1,52	1,95	-	-	0,51

Примечание. (-) – отсутствие данных.

Note. (-) – no data.

Таблица 4. Оценка экологического состояния исследованных водных объектов по интегральному показателю Q
 Table 4. Assessment of the water bodies ecological status by the integral index Q

Водный объект Water body	Q	Экологическое состояние Ecological status
оз. Большой Иван Lake Bolshoi Ivan	0,14	Благополучное Good
оз. Черетвицы Lake Cheretvitsy	0,16	Удовлетворительное Satisfactory
оз. Балаздынъ Lake Balazdyn	0,18	
оз. Урицкое Lake Uritskoe	0,20	
бух. Петрокрепость 2012 г. Petrokrepost Bay (2012)	0,23	
бух. Петрокрепость 2013 г. Petrokrepost Bay (2013)	0,31	

Заключение

В результате работы построена модель-классификация для оценки состояния водных экосистем. Предусматривается выделение пяти категорий экологического состояния водоема: катастрофическое, кризисное, неудовлетворительное, удовлетворительное и благополучное.

В качестве приоритетных признаков в модели использованы удельный комбинаторный индекс загрязненности воды, индекс сапробности Пантле – Букка в модификации Сладечка (по фитопланктону) и токсикологические характеристики.

Токсикологический признак в модели-классификации вариативен, то есть для расчетов из всех биотестовых результатов должен быть выбран тот, который демонстрирует больший уровень токсичности. Это позволит гарантированно подтвердить наличие или отсутствие интегрального токсического действия природных вод.

Строгое выделение категорий экологического состояния водоемов по трем перечисленным показателям токсичности несколько затруднительно. Методические руководства предусматривают лишь определение наличия токсического действия или его отсутствия (для *Daphnia magna* и *Chlorella vulgaris*) либо установление степени токсичности (для *Paramecium caudatum*). Однако, базируясь на действующих методиках и классификациях, изложенных в работах Л. П. Брагинского, О. П. Оксюка, В. Н. Жукинского с соавторами [Брагинский, 1985; Оксюк и др., 1993], были назначены границы для всех пяти категорий состояния. Причем категориям «благополучное» и «удовлетворительное» экологическое состояние соответствует область с отсутствием острого токсического действия или – для инфузорий – область допустимой степени токсичности. Категория «катастрофическое» экологическое состояние соответствует практически 100% смертности дафний и 100% стимуляции

(или подавлению) роста культуры хлореллы, а также верхней половине диапазона «высокая степень токсичности» для инфузорий. На две оставшиеся категории – «неудовлетворительное» и «кризисное» экологическое состояние – приходится оставшаяся часть шкалы токсикологических характеристик.

Следует отметить, что подобное выделение диапазонов изменения выбранных токсикологических характеристик не является строго обязательным. Так, в данной работе предложено выделение пяти категорий экологического состояния. Однако возможно выделение и четырех, и шести, и т. д. категорий, в зависимости от цели исследования. Изменения в нормативных документах также могут вызвать необходимость корректировки предложенных диапазонов. Модель-классификация может быть расширена путем включения в нее признаков токсикологических характеристик для других тест-объектов.

Результат интегральной оценки экологического состояния озер с использованием трех приоритетных признаков (гидрохимического, гидробиологического и токсикологического) показал, что состояние лишь одного из исследованных озер – оз. Большой Иван в Псковской области – является благополучным. Остальные водные объекты характеризуются удовлетворительным экологическим состоянием.

Обращает на себя внимание ухудшение экологического состояния бухты Петрокрепость Ладожского озера. Несмотря на то что по данным обоих лет оно признано «удовлетворительным», рассчитанный интегральный индекс за 2013 г. находится на границе классов. Таким образом, состояние водного объекта приблизилось к категории «неудовлетворительное».

Авторы очень признательны Е. Ю. Воякиной за предоставленные данные о фитопланктоне бухты Петрокрепость Ладожского озера, Н. М. Калининной – за продуктивные дискуссии о модели-классификации и А. В. Бабинину – за геоинформационную поддержку.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-35-00382 мол_а.

Литература

Бакаева Е. Н. Методологические подходы к оценке экотоксичности малых рек в районе влияния техногенных шахтных вод Восточного Донбасса // Геоэкологические проблемы углепромышленных территорий. Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2015. С. 26–35.

Бакаева Е. Н., Игнатова Н. А. К методологии экотоксикологического изучения формирования и восстановления качества вод в условиях антропогенных нагрузок в поверхностных водных объектах // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.»: Сб. науч. тр. всерос. науч. конф. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. Т. 1. С. 223–230.

Бакаева Е. Н., Никаноров А. М. Гидробионты в оценке качества вод суши. М.: Наука, 2006. 240 с.

Баканов А. И. Использование зообентоса для мониторинга пресноводных водоемов // Биология внутренних вод. 2000. № 1. С. 68–82.

Барина С. С., Медведева Л. А., Анисимова О. В. Биоразнообразии водорослей-индикаторов окружающей среды. Тель-Авив: PiliesStudio, 2006. 498 с.

Брагинский Л. Л., Буртная И. Л., Щербань Э. П. Токсичность синтетических моющих средств для массовых форм пресноводных беспозвоночных // Экспериментальные исследования влияния загрязнений на водные организмы. Апатиты: Кольский фил. АН СССР, 1979. С. 24–30.

Брагинский Л. П. Некоторые принципы классификации пресноводных экосистем по уровням токсической загрязненности // Гидробиологический журнал. 1985. Т. 21, № 6. С. 65–74.

Гальцова В. В., Алексеев Д. К., Куличенко А. Ю. Экологические проблемы водотоков и водоемов Санкт-Петербурга и пути их решения // Географические и экологические аспекты гидрологии. СПб.: СПбГУ, 2010. С. 116–121.

ГОСТ 17.1.3.07–82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. 1982.

Грибовский Ю. Г., Нохрин Д. Ю., Торчицкий А. Н., Давыдова Н. А. Результаты комплексного обследования экологического состояния Магнитогорского водохранилища // Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2009. № 1. С. 64–69.

Доклад об экологической ситуации в Ленинградской области в 2013 году. Комитет по природным ресурсам Ленинградской области. СПб., 2014. 108 с.

Дмитриев В. В., Мьякишева Н. В., Третьяков В. Ю., Хованов Н. В. Многокритериальная оценка экологического состояния и устойчивости геосистем на основе метода сводных показателей. II. Трофический статус водных экосистем // Вестник СПбГУ. Сер. 7, вып. 1 (№ 7), 1997. С. 51–67.

Дмитриев В. В. Экологическое нормирование состояния и антропогенных воздействий на природные системы // Вестник СПбГУ. Сер. 7, вып. 2 (№ 14). 1994. С. 60–70.

Дмитриев В. В. Эколого-географическая оценка состояния внутренних водоемов: Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. СПб., 2000. 52 с.

Жмур Н. С. Токсикологический мониторинг источников загрязнения водных объектов // Токсикологический вестник. 1999. № 3. С. 7–13.

Игнатова Н. В., Петрова Т. Н., Сусарева О. М., Щербак В. А. Оценка экологического состояния озера и качества его вод по гидрохимическим показателям // Ладога. СПб.: Нестор-История, 2013. С. 333–341.

Кондратьев С. А., Поздняков Ш. Р. Озеро как источник водных ресурсов // Ладога. СПб.: Нестор-История, 2013. С. 394–397.

Крайнюкова А. Н. Система интегральной токсикологической оценки природных и сточных вод // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2009. № 37. С. 30–33.

Кулангиева Л. В., Гальцова В. В. Оценка экологического состояния водотоков Санкт-Петербурга методом биотестирования // Водные объекты Санкт-Петербурга. СПб.: Символ, 2002. С. 60–64.

Лесников Л. А. Основные задачи, возможности и ограничения биотестирования // Теоретические вопросы биотестирования. Волгоград, 1983. С. 3–12.

Лозовик П. А., Платонов А. В. Определение региональных предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ на примере Карельского гидрографического района // Геоэкология. Инженерная экология. Гидрология. Геокриология. 2005. № 6. С. 527–532.

Макрушин А. В. Биологический анализ качества вод. Л.: Зоол. ин-т АН СССР, 1974. 59 с.

Методика «Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия» (утв. Минприроды РФ 30.11.1992).

Оксиюк О. П., Жукинский В. Н., Брагинский Л. П., Линник П. Н., Кузьменко М. И., Кленус В. Г. Комплексная экологическая классификация качества поверхностных вод суши // Гидробиологический журнал. 1993. Т. 29, вып. 4. С. 62–76.

ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.12-06 Т 16.1:2:2.3:3.9-06. Методика измерений количества *Daphnia magna* Straus для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления методом прямого счета. М., 2014а. 38 с.

ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04 Т 16.1:2:2.3:3.7-04. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. М., 2014б. 36 с.

Примак Е. А., Зуева Н. В. Интегральная оценка экологического благополучия водных экосистем // Водные ресурсы: изучение и управление: Материалы V межд. конф. молодых ученых. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2016. Т. 2. С. 338–343 с.

Р 52.24.566-94. Рекомендации. Методы токсикологической оценки загрязнения пресноводных экосистем. М., 1994.

Р 52.24.690-2006. Рекомендации. Оценка токсического загрязнения вод водотоков и водоемов различной солености и зон смешения речных и морских вод методами биотестирования. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2006.

Р 52.24.763-2012. Рекомендации. Оценка состояния пресноводных экосистем по комплексу

химико-биологических показателей. Ростов-на-Дону: Росгидромет, 2012.

РД 52.24.643-2002. Методические указания. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Росгидромет. СПб: Гидрометеиздат, 2003.

Романенко В. Д., Оксиюк О. П., Жукинский В. Н., Стольберг Ф. В., Лаврик В. И. Экологическая оценка воздействия гидротехнического строительства на водные объекты. Киев: Наукова Думка, 1990. 256 с.

Руководство по гидробиологическому мониторингу пресноводных экосистем / Под ред. В. А. Абакумова. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 318 с.

Рыжков Л. П. Озера бассейна северной Ладоги. Петрозаводск: ПетрГУ, 1999. 204 с.

Строганов Н. С., Колосова Л. В. Ведение лабораторной культуры и определение плодовитости дафний в ряде поколений // Методики биологических исследований по водной токсикологии. М.: Наука, 1971. С. 210–216.

Тихановская Г. А., Машихина Ю. В. Оценка экологического состояния водотоков Рыбинского водохранилища // Вестник Вологодского государственного университета. 2016. Сер. 11, № 1(15). С. 33–40. doi: 10.15688/jvolsu11.2016.1.4

Филенко О. Ф., Лазарева В. В. Влияние токсических агентов на общебиологические и цитогенетические показатели у дафний // Гидробиологический журнал. 1989. Вып. 3. С. 56–60.

Флеров Б. А. Эколого-физиологические аспекты токсикологии пресноводных животных. Л.: Наука, 1989. 144 с.

ФР.1.39.2015.19242. Методика определения токсичности проб природных, питьевых, хозяйственно-питьевых, хозяйственно-бытовых сточных, очищенных сточных, сточных, талых, технологических вод экспресс-методом с применением прибора серии «Биотестер». СПб.: Спектр-М, 2015. 21 с.

Хованов Н. В. Анализ и синтез показателей в условиях информационного дефицита. СПб.: СПбГУ, 1996. 196 с.

Хоружая Т. А., Минина Л. И. Оценка экологического состояния Цимлянского, Пролетарского и Веселовского водохранилищ // Метеорология и гидрология. 2017. № 5. С. 116–122.

Черкашин С. А. Биотестирование: терминология, задачи, основные требования и применение в рыбохозяйственной токсикологии // Известия ТИНРО. 2001. № 1–3. С. 1020–1035.

Шитиков В. К., Розенберг Г. С., Зинченко Т. Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. 463 с.

WFD – Water Framework Directive 2000/60/EC [Электронный ресурс]. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0060> (дата обращения: 20.09.2017).

Поступила в редакцию 27.09.2017

References

- Bakaeva E. N.* Metodologicheskie podkhody k otsenke ekotoksichnosti malyykh rek v raione vliyaniya tekhnogennykh shakhtnykh vod Vostochnogo Donbassa [Methodological approaches to the assessment of ecological toxicity of small rivers exposed to the impact of mine drainage of the Eastern Donets Black Coal Basin]. *Geoekologicheskie problemy uglepromyshlennykh territorii* [Geoecol. Probl. Coal-mining Areas]. Rostov-na-Donu: Izd-vo YuFU, 2015. P. 26–35.
- Bakaeva E. N., Ignatova N. A.* K metodologii ekotoksikologicheskogo izucheniya formirovaniya i vosstanovleniya kachestva vod v usloviyakh antropogennykh nagruzok v poverkhnostnykh vodnykh ob"ektakh [On the methodology of the ecotoxicological study of formation and regeneration of waters quality under anthropogenic impact in water bodies surface waters]. *Nauchnoe obespechenie realizatsii Vodnoi strategii Rossiiskoi Federatsii na period do 2020 g.*: Sbornik nauch. trudov vsenos. nauch. konf. [Scientific Support of the Water Strategy of the Russian Federation for the period up to 2020: Coll. of Papers of the All-Russ. Conf.]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2015. Vol. 1. P. 223–230.
- Bakaeva E. N., Nikanorov A. M.* Gidrobionty v otsenke kachestva vod sushi [Hydrobionts for the assessment of land water quality]. Moscow: Nauka, 2006. 240 p.
- Bakanov A. I.* Ispol'zovanie zoobentosa dlya monitoringa presnovodnykh vodoemov [The use of zoobenthos for freshwater bodies monitoring]. *Biologiya vnutrennikh vod* [Inland Water Biol.]. 2000. No. 1. P. 68–82.
- Barinova S. S., Medvedeva L. A., Anisimova O. V.* Bioraznoobrazie vodoroslei-indikatorov okruzhayushchei sredy [Biological diversity of algae – indicators of environment state]. Tel'-Aviv: PiliesStudio, 2006. 498 p.
- Braginskii L. L., Burtynaya I. L., Shcherban' E. P.* Toksichnost' sinteticheskikh moyushchikh sredstv dlya massovykh form presnovodnykh bespozvonochnykh [Toxicity of synthetic household chemicals for mass forms of freshwater invertebrates]. *Eksperimental'nye issledovaniya vliyaniya zagryaznenii na vodnye organizmy* [Exp. Study Poll. Impact Water Org.]. Apatity: Kol'skii fil. AN SSSR, 1979. P. 24–30.
- Braginskii L. P.* Nekotorye printsipy klassifikatsii presnovodnykh ekosistem po urovnym toksicheskoi zagryaznennosti [Some principles of freshwater ecosystems classification in accordance with toxic contamination levels]. *Gidrobiologicheskii zhurnal* [Hydrobiological J.]. 1985. Vol. 21, no. 6. P. 65–74.
- Cherkashin S. A.* Biotestirovanie: terminologiya, zadachi, osnovnye trebovaniya i primenenie v rybokhozyaistvennoi toksikologii [Biological testing: terminology, general requirements, and application of fishery toxicology]. *Izvestiya TINRO* [Russ. J. Marine Biol.]. 2001. No. 1–3. P. 1020–1035.
- Doklad ob ekologicheskoi situatsii v Leningradskoi oblasti v 2013 godu* [A report on the ecological situation in the Leningrad region in 2013]. Komitet po prirodnym resursam Leningradskoi oblasti [The Committee on Nat. Res. of the Leningrad Region]. St. Petersburg, 2014. 108 p.
- Dmitriev V. V., Myakisheva N. V., Tret'yakov V. Yu., Khovanov N. V.* Mnogokriterial'naya otsenka ekologicheskogo sostoyaniya i ustoichivosti geosistem na osnove metoda svodnykh pokazatelei. II. Troficheskii status vodnykh ekosistem [Multi-criteria assessment of ecological state and geosystems stability based on the method of consolidated indices. II. Trophic status of water ecosystems]. *Vestnik SPbGU* [Vestnik of St. Petersburg Univ.]. Ser. 7, iss. 1 (no. 7). 1997. P. 51–67.
- Dmitriev V. V.* Ekologicheskoe normirovanie sostoyaniya i antropogennykh vozdeistvii na prirodnye sistemy [Ecological regulation of state and man-induced impact on natural systems]. *Vestnik SPbGU* [Vestnik of St. Petersburg Univ.]. Ser. 7, iss. 2 (no. 14). 1994. P. 60–70.
- Dmitriev V. V.* Ekologo-geograficheskaya otsenka sostoyaniya vnutrennikh vodoemov [Ecological and geographical assessment of inland water bodies state]: Summary of PhD (Dr. of Geogr.) thesis. St. Petersburg, 2000. 52 p.
- Fileenko O. F., Lazareva V. V.* Vliyanie toksicheskikh agentov na obshchebiologicheskie i tsitogenicheskie pokazateli u dafnii [Impact of toxic agents on general biological and cytogenetic indices of daphnia]. *Gidrobiologicheskii zhurnal* [Hydrobiological J.]. 1989. Iss. 3. P. 56–60.
- Flerov B. A.* Ekologo-fiziologicheskie aspekty toksikologii presnovodnykh zhivotnykh [Ecological and physiological aspects of freshwater animals toxicology]. Leningrad: Nauka, 1989. 144 p.
- FR. 1.39.2015.19242.* Metodika opredeleniya toksichnosti prob prirodnykh, pit'evykh, khozyaistvenno-pit'evykh, khozyaistvenno-bytovykh stochnykh, ochishchennykh stochnykh, stochnykh, talykh, tekhnologicheskikh vod ekspress-metodom s primeneniem pribora serii Biotester [A technique of determination of toxicity in natural tests, drinking, industrial and drinking, the economic and household waste, cleared waste, waste, thawed, technological waters by express method with use of the Biotester device]. St. Petersburg: Spektr-M, 2015. 21 p.
- Gal'tsova V. V., Alekseev D. K., Kulichenko A. Yu.* Ekologicheskie problemy vodotokov i vodoemov Sankt-Peterburga i puti ikh resheniya [Ecological problems of watercourses and water bodies in St. Petersburg and ways of their solution]. *Geograficheskie i ekologicheskie aspekty gidrologii* [Geog. Ecol. Aspects Hydrol.]. St. Petersburg: SPbGU, 2010. P. 116–121.
- GOST 17.1.3.07-82.* Ohrana prirody. Gidrosfera. Pravila kontrolya kachestva vody vodoemov i vodotokov [Nature protection. Hydroshere. Procedures for quality control of water in reservoirs and stream flows]. 1982.
- Gribovskii Yu. G., Nokhrin D. Yu., Torchitskii A. N., Davydova N. A.* Rezul'taty kompleksnogo obsledovaniya ekologicheskogo sostoyaniya Magnitogorskogo vodokhranilishcha [The results of complex study of ecological state of Magnitogorsk reservoir]. *Problemy veterinarnoi sanitarii, gigieny i ekologii* [Iss. Vet. Sanitation, Hygiene, and Ecol.]. 2009. No. 1. P. 64–69.
- Ignat'eva N. V., Petrova T. N., Susareva O. M., Shcherbak V. A.* Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya ozera i kachestva ego vod po gidrokhimicheskimi pokazatelyam [Assessment of the ecological state of a lake

and its waters by hydrochemical indices]. *Ladoga* [Ladoga]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2013. P. 333–341.

Khovanov N. V. Analiz i sintez pokazatelei v usloviyakh informatsionnogo defitsita [Analysis and synthesis of indices in the conditions of information shortage]. St. Petersburg: SPbGU, 1996. 196 p.

Khoruzhaya T. A., Minina L. I. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya Tsimlyanskogo, Proletarskogo i Veselovskogo vodokhranilishch [Assessment of ecological state of Tsimlyansk, Proletarskoe, and Veselovskoe reservoirs]. *Meteorologiya i gidrologiya* [Metr. Hydrol.]. 2017. No. 5. P. 116–122.

Kondrat'ev S. A., Pozdnyakov Sh. R. Ozero kak istochnik vodnykh resursov [A lake as a source of water resources]. *Ladoga* [Ladoga]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2013. P. 394–397.

Krainyukova A. N. Sistema integral'noi toksikologicheskoi otsenki prirodnykh i stochnykh vod [A system for integral toxicological assessment of natural and wastewater]. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal perezodnykh tekhnologii* [Eastern-European J. of Enterprise Technologies]. 2009. No. 37. P. 30–33.

Kulangieva L. V., Gal'tsova V. V. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya vodotokov Sankt-Peterburga metodom biotestirovaniya [Assessment of ecological state of St. Petersburg watercourses by the method of biological testing]. *Vodnye ob'ekty Sankt-Peterburga* [Water Bodies of St. Petersburg]. St. Petersburg: Simvol, 2002. P. 60–64.

Lesnikov L. A. Osnovnye zadachi, vozmozhnosti i ogranicheniya biotestirovaniya [Main tasks, potential, and restrictions of biological testing]. *Teoreticheskie voprosy biotestirovaniya* [Theor. Iss. Biotesting]. Volgograd, 1983. P. 3–12.

Lozovik P. A., Platonov A. V. Opredelenie regional'nykh predel'no dopustimyykh konsentratsii zagryaznyayushchikh veshchestv na primere Karel'skogo gidrograficheskogo raiona [Determination of regional maximum permissible concentrations of pollutants by the example of Karelia hydrographic region]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrologiya. Geokriologiya* [Geoecology. Eng. Ecology. Hydrol. Geocryol.]. 2005. No. 6. P. 527–532.

Makrushin A. V. Biologicheskii analiz kachestva vod [Biological analysis of water quality]. Leningrad: Zool. in-t AN SSSR, 1974. 59 p.

Metodika "Kriterii otsenki ekologicheskoi obstanovki territorii dlya vyyavleniya zon chrezvychainoi ekologicheskoi situatsii i zon ekologicheskogo bedstviya" [Criteria of ecological situation assessment for determining environmental disaster areas and zones of ecological disorder: a technique] (utv. Minprirody RF 30.11.1992)

Oksiyuk O. P., Zhukinskii V. N., Braginskii L. P., Linnik P. N., Kuz'menko M. I., Klenus V. G. Kompleksnaya ekologicheskaya klassifikatsiya kachestva poverkhnostnykh vod sushi [Complex ecological classification of surface waters quality]. *Gidrobiologicheskii zhurnal* [Hydrobiological J.]. 1993. Vol. 29, iss. 4. P. 62–76.

PND F T 14.1:2:3:4.12-06 T 16.1:2:2.3:3.9-06. Metodika izmerenii kolichestva *Daphnia magna Straus* dlya opredeleniya toksichnosti pit'evykh, presnykh prirodnykh i stochnykh vod, vodnykh vytyazhek iz gruntov,

pochv, osadkov stochnykh vod, otkhodov proizvodstva i potrebleniya metodom pryamogo scheta [Methods for calculating *Daphnia magna Straus* quantity to determine the toxicity of drinking water, natural freshwater and wastewater, water extracts from ground, soils, wastewater sediments, industrial and household waste by direct calculation method]. Moscow, 2014. 38 p.

PND F T 14.1:2:3:4.10-04 T 16.1:2:2.3:3.7-04. Metodika izmerenii opticheskoi plotnosti kul'tury vodorosli khlorella (*Chlorella vulgaris Beijer*) dlya opredeleniya toksichnosti pit'evykh, presnykh prirodnykh i stochnykh vod, vodnykh vytyazhek iz gruntov, pochv, osadkov stochnykh vod, otkhodov proizvodstva i potrebleniya [Methods for assessing *Chlorella vulgaris* Beijer optical density to determine the toxicity of drinking water, natural freshwater and wastewater, water extracts from ground, soils, wastewater sediments, industrial and household waste]. Moscow, 2014. 36 p.

Primak E. A., Zueva N. V. Integral'naya otsenka ekologicheskogo blagopoluchiya vodnykh ekosistem [Integral assessment of ecological state of water ecosystems]. *Vodnye resursy: izuchenie i upravlenie: Materialy V mezhd. konf. molodykh uchenykh* [Water Res.: Study and Management. Proceed. V Int. Conf. Young Scientists]. Petrozavodsk: KarRC RAS, 2016. Vol. 2. P. 338–343 p.

R 52.24.566-94. Rekomendatsii. Metody toksikologicheskoi otsenki zagryazneniya presnovodnykh ekosistem [Recommendations. The methods for toxicological assessment of pollution of freshwater ecosystems]. Moscow, 1994.

R 52.24.690-2006. Rekomendatsii. Otsenka toksicheskogo zagryazneniya vod vodotokov i vodoemov razlichnoi solenosti i zon smesheniya rechnykh i morskikh vod metodami biotestirovaniya [R 52.24.690-2006. Recommendations. Assessment of toxicological contamination of watercourses and water bodies of different salinity and zones of river and sea waters mixing by methods of biological testing]. Rostov-na-Donu: Rosgidromet, 2006.

R 52.24.763-2012. Rekomendatsii. Otsenka sostoyaniya presnovodnykh ekosistem po kompleksu khimiko-biologicheskikh pokazatelei [R 52.24.763-2012. Recommendations. Assessment of freshwater ecosystems state by a complex of chemical and biological indices]. Rostov-na-Donu: Rosgidromet, 2012.

RD 52.24.643-2002. Metodicheskie ukazaniya. Metod kompleksnoi otsenki stepeni zagryaznenosti poverkhnostnykh vod po gidrokhimicheskim pokazatelyam. Rosgidromet [Directive document RD 52.24.643–2002. A method of complex assessment of the degree of surface water contamination by hydrochemical indices]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2003.

Romanenko V. D., Oksiyuk O. P., Zhukinskii V. N., Stol'berg F. V., Lavrik V. I. Ekologicheskaya otsenka vozdeistviya gidrotekhnicheskogo stroitel'stva na vodnye ob'ekty [Ecological assessment of hydro-technical construction impact on water bodies]. Kiev: Naukova Dumka, 1990. 256 p.

Rukovodstvo po gidrobiologicheskomu monitoringu presnovodnykh ekosistem [A manual on hydrobiological monitoring of freshwater ecosystems]. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992. 318 p.

Ryzhkov L. P. Ozera basseina severnoi Ladogi [Lakes of northern Lake Ladoga basin]. Petrozavodsk: PetrGU, 1999. 204 p.

Shitikov V. K., Rozenberg G. S., Zinchenko T. D. Kolichestvennaya gidroekologiya: metody sistemnoi identifikatsii [Quantitative hydroecology: methods of systematic identification]. Tol'yatti: IEVB RAN, 2003. 463 p.

Stroganov N. S., Kolosova L. V. Vedenie laboratornoi kul'tury i opredelenie plodovitosti dafnii v ryade pokolenii [Laboratory culture maintenance and determination of daphnia prolificacy in several generations]. *Metodiki biologicheskikh issledovaniy po vodnoi toksikologii* [Methodology for Biol. Res. of Water Toxicol.]. Moscow: Nauka, 1971. P 210–216.

Tikhonovskaya G. A., Mashikhina Yu. V. Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya vodotokov Rybinskogo

vodokhranilishcha [Assessment of the ecological state of the Rybinsk reservoir watercourses]. *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vestnik Vologda St. Univ.]. 2016. Ser. 11, no. 1(15). P. 33–40. doi: 10.15688/jvolsu11.2016.1.4

Zhmur N. S. Toksikologicheskii monitoring istochnikov zagryazneniya vodnykh ob'ektov [Toxicological monitoring of resources of water bodies pollution]. *Toksikologicheskii vestnik* [Toxicol. Review]. 1999. No. 3. P. 7–13.

WFD – Water Framework Directive 2000/60/EC. URL: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32000L0060> (accessed: 20.09.2017).

Received September 27, 2017

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Зуева Надежда Викторовна

доцент кафедры прикладной и системной экологии, к. г. н. Российский государственный гидрометеорологический университет
ул. Воронежская, 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: nady.zuyeva@ya.ru

Козлова Алина Вячеславовна

магистрант кафедры прикладной и системной экологии Российский государственный гидрометеорологический университет
ул. Воронежская, 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: alinchkakzlv@rambler.ru

Куличенко Анастасия Юрьевна

преподаватель кафедры прикладной и системной экологии Российский государственный гидрометеорологический университет
ул. Воронежская, 79, Санкт-Петербург, Россия, 192007
эл. почта: au_kulichenko@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Zueva, Nadezhda

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: nady.zuyeva@ya.ru

Kozlova, Alina

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: alinchkakzlv@rambler.ru

Kulichenko, Anastasia

Russian State Hydrometeorological University
79 Voronezhskaya St., 192007 St. Petersburg, Russia
e-mail: au_kulichenko@mail.ru