

УДК 628.312.5(470.341)

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИИ ЖЕЛАТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СТОЧНЫХ ВОД

Д.Б. Гелашвили, А.В. Лисовенко, М.Е. Безруков

*Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
Россия, 603950, Нижний Новгород, просп. Гагарина, 23  
E-mail: ecology@bio.unn.ru*

Поступила в редакцию 14.11.09 г.

**Применение интегральных показателей на основе функции желательности для комплексной оценки качества сточных вод.** – Гелашвили Д.Б., Лисовенко А.В., Безруков М.Е. – Разработаны и обоснованы алгоритмы применения обобщенной функции желательности для комплексной оценки опасности и токсичности сточных вод как многокомпонентных систем. Учет весовых коэффициентов при расчете обобщенной функции желательности позволил повысить степень дискриминации сравниваемых проб сточных вод как по их химическому составу, так и токсическим свойствам.

*Ключевые слова:* обобщенная функция желательности, весовой коэффициент, экотоксикология, сточные воды.

**Usage of integral desire-function-based indices for complex estimation of sewage quality.** – Gelashvili D.B., Lisovenko A.V., and Bezrukov M.E. – Several algorithms of applying the generalized desire function for complex estimation of the quality and toxicity of sewage as a multi-component system have been developed and justified. Using weight coefficients in the desire function calculation has allowed us to improve the discrimination degree of waste water samples under comparison by both chemical composition and toxicity.

*Key words:* generalized desire function, weight coefficient, ecological toxicology, sewage.

### ВВЕДЕНИЕ

Важность разностороннего контроля и оценки качества сточных вод на предприятии диктуется необходимостью установления влияния их сброса на водные экосистемы. При этом на большинстве предприятий такой контроль проводится по перечням химических показателей, определяемых исходя из тех процессов, в результате которых образуются сточные воды. Однако если сточные воды имеют многокомпонентный состав, одного химического контроля недостаточно для оценки их опасности для биологических организмов, и возникает необходимость токсикологического контроля. Несмотря на то, что токсичность сточных вод определяется содержанием в них загрязняющих веществ, выявление зависимостей между степенью токсичности вод и концентрациями веществ в них является нетривиальной задачей и представляет особую сложность для сточных вод многокомпонентного состава. Установление таких связей имеет прогностическое значение, дает возможность разрабатывать рекомендации по нормированию сброса загрязняющих веществ и принимать управленческие решения, направленные на сокращение вредного антропогенного влияния на водные экосистемы (Жмур, 1997; Гелашвили и др., 1999).

Для сравнительного анализа качества сточных вод требуется применение интегральных показателей, которые на основе комплексной характеристики их многокомпонентного состава могут дать корректные оценки экотоксикологических эффектов.

Известны методы комплексной оценки объектов окружающей среды по набору различных показателей (Федоров и др., 1981; Воробейчик и др., 1984; Новиков, Плитман, 1984; Шитиков и др., 2005). В том числе предложен целый ряд метрик для комплексной оценки природных вод по гидрохимическим показателям (Фруммин, Баркан, 1997; Баканов, 1999; Зинченко и др., 2000; Фруммин, 2000; Гелашвили и др., 2002 и др.). В то же время существует определенный пробел в разработке методов комплексной оценки экотоксикологического статуса сточных вод как многокомпонентной системы. В качестве интегрального показателя качества сточных вод может быть использована обобщенная функция желательности (ОФЖ) (Адлер и др., 1976), которая, в свою очередь, рассчитывается на основе частных функций желательности. Эффективность применения обобщенной функции желательности для решения задач прикладной экологии была продемонстрирована в работах В.Д. Федорова с соавторами (1981), Г.Т. Фрумина и Л.В. Баркана (1997), В.Н. Носова с соавторами (1997), Н.Г. Булгакова (2002), А.А. Королева с соавторами (2007), Д.Б. Гелашвили с соавторами (2009). Однако до настоящего времени отсутствовал метод интегральной оценки качества сточных вод на основе ОФЖ, включающий содержательное экотоксикологическое толкование весовых коэффициентов, входящих в ее формулу.

В связи с вышеизложенным целью настоящей работы явилась разработка методики расчета интегральных показателей качества сточных вод на основе ОФЖ, которые могут стать эффективным инструментом для решения ряда водоохранных задач: интегральной оценки качества сточных вод по их химическому составу; интегральной оценки токсических свойств сточных вод; выявлению наиболее опасных компонентов сточных вод в конкретном выпуске; оценке динамики качества сточных вод, отводимых через конкретный выпуск; ранжированию выпусков по качеству сточных вод, оцениваемых по комплексу химических показателей и токсическим свойствам.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Интегральная оценка качества сточных вод была проведена на примере одного из предприятий машиностроительного комплекса Нижегородской области. На этом предприятии в течение 2003 – 2007 гг. на основе действующей нормативно-технической и методической документации проводилось комплексное изучение химического состава и параметров токсичности сточных вод, сбрасываемых через семь организованных выпусков.

Токсичность сточных вод исследовалась с применением биотеста на инфузориях *Paramecium caudatum* (2003 – 2007 гг.) в соответствии с методическими рекомендациями (Методика определения токсичности воды..., 1998).

Статистический анализ экспериментальных данных был проведен с помощью пакета Statistika 6.0.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим полученные результаты по разработке и обоснованию алгоритмов расчета частной и обобщенной функции желательности для оценки качества сточных вод по химическому составу и показателям токсичности, а также верификации предложенных алгоритмов на примере организованных выпусков сточных вод машиностроительного предприятия.

Напомним, что функции желательности представляют собой способ перевода натуральных значений в единую безразмерную числовую шкалу с фиксированными границами. При этом граничные значения функции, например 0 и 1, соответствуют градациям «плохо – хорошо». Необходимость введения функций желательности часто определяется различной размерностью переменных, входящих в интегральный показатель, что не позволяет усреднять их непосредственно. Перевод же в единую для всех числовую шкалу снимает это затруднение и дает возможность объединять в единый показатель самые разные параметры. Конкретные способы реализации функции желательности могут быть весьма разнообразны: экспертные функции желательности, простые аналитические функции желательности, функция желательности Харрингтона и др. (Адлер и др., 1976; Воробейчик и др., 1984).

### Оценка качества сточных вод по их химическому составу с помощью обобщенной функции желательности

В общем виде обобщенная функция желательности рассчитывается по формуле среднего геометрического взвешенного набора вещественных чисел ( $d_1 \dots d_n$ ) с вещественными весами ( $\alpha_1 \dots \alpha_n; \beta_1 \dots \beta_n$ ) и определяется как

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n (d_i^\alpha)^\beta} = \sqrt[n]{d_1^{\alpha\beta} \cdot d_2^{\alpha\beta} \cdot d_3^{\alpha\beta} \dots d_n^{\alpha\beta}}, \quad (1)$$

где  $n$  – число показателей;  $d_i$  – частная функция желательности;  $\alpha$  и  $\beta$  – весовые коэффициенты,  $K = \sum_{i=1}^n \alpha_i \beta_i$ . Мы предлагаем следующую интерпретацию весовых коэффициентов:  $\alpha_i$  – коэффициент, учитывающий класс опасности  $i$ -го загрязняющего вещества;  $\beta_i$  – коэффициент, учитывающий превышение среднего измеренного значения концентрации показателя над нормативом. Обобщенная функция желательности есть средняя геометрическая частных функций желательности ( $d_i$ ), и если хотя бы одна из  $d_i$  равна нулю, то и  $D = 0$ . Такой случай возможен при использовании линейной нормировки по «минимуму» для эмпирического ряда переменных с фиксированными значениями  $X_{\min}$  и  $X_{\max}$  (Воробейчик и др., 1984). Чтобы избежать «зануления» ОФЖ, нами был предложен для расчета частных функций желательности алгоритм, основанный на свертке функций (Гелашвили и др., 2009).

Для рассматриваемого случая (оценка качества сточных вод) расчет частной функции желательности производится по формуле

$$d_i = \frac{2(x_i \cdot x_{\text{норм}})}{x_i^2 + x_{\text{норм}}^2}, \quad (2)$$

где  $x_i$  – среднее значение концентраций  $i$ -го загрязняющего вещества за исследуемый период;  $x_{\text{норм}}$  – ПДК для водных объектов рыбохозяйственного назначения (ПДК<sub>р.х</sub>). Заметим, что в случае двусторонней схемы приближения к нормативу (например, рН) для расчета оптимального значения частной функции желательности можно воспользоваться алгоритмом, предложенным В.Н. Носовым с соавторами (1997). Расчет обобщенной функции желательности производится по всем показателям (ингредиентам), характеризующим качество сточных вод. Введение в формулу (1) весового коэффициента  $\alpha$  позволяет учитывать степень опасности загрязняющего вещества, сбрасываемого со сточными водами. Степень опасности вещества определяется его классом опасности, указанным в «Перечне рыбохозяйственных нормативов...» (1999). Коэффициент  $\alpha$  является величиной, обратной значению класса опасности вещества (табл. 1).

**Таблица 1**  
Значения коэффициента  $\alpha$   
для веществ 1 – 4-го классов опасности

Класс опасности загрязняющего вещества	Весовой коэффициент, $\alpha$
1	1
2	0.5
3	0.33
4	0.25

Для ряда показателей не установлены значения класса опасности, в частности для взвешенных веществ – рН, БПК<sub>5</sub>, ХПК. Для них коэффициент  $\alpha$  устанавливается следующим образом: в случае, когда среднее значение измеренной концентрации не превышает допустимого значения, принимается  $\alpha = 0.25$ .

Если среднее измеренное значение превышает допустимое, принимается  $\alpha = 1$ . Введение коэффициента  $\alpha$  в формулу (1) в качестве показателя степени частной функции желательности  $d_i$  изменяет ее значение таким образом, что чем больше значение коэффициента  $\alpha$ , тем меньше значение частной функции желательности, следовательно, тем менее желателен сброс данного загрязняющего вещества.

Весовой коэффициент  $\beta$  позволяет учесть уровень превышения содержания данного компонента над допустимым значением. Весовой коэффициент  $\beta$  представляет собой отношение средней измеренной концентрации вещества  $x_i$  к допустимой  $x_{\text{доп},i}$ :

$$\beta_i = x_i / x_{\text{доп},i}, \quad (3)$$

где  $x_i$  – среднее значение измеренного  $i$ -го показателя;  $x_{\text{доп},i}$  – допустимое значение  $i$ -го показателя.

За  $x_{\text{доп}}$  принимается значение концентрации вещества, согласованной в томе НДС (нормативов допустимого сброса) в качестве допустимой концентрации. Для веществ, не учтенных при согласовании НДС, за  $x_{\text{доп}}$  принимается ПДК<sub>р.х</sub>.

Введение коэффициента  $\beta$  в формулу (1) в качестве показателя степени частной функции желательности  $d_i$  влияет на нее таким образом, что при его увеличении значение частной функции желательности снижается, и, следовательно, вносится больший вклад в снижение обобщенной функции желательности.

### Оценка токсических свойств сточных вод с помощью обобщенной функции желательности

Интегральная оценка токсических свойств сточных вод с помощью обобщенной функции желательности производится по формуле

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

$$D = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n d_i^{\gamma_i}} = \sqrt[n]{d_1^{\gamma_1} \cdot d_2^{\gamma_2} \cdot d_3^{\gamma_3} \dots d_n^{\gamma_n}}, \quad (4)$$

где  $n$  – число показателей;  $d_i$  – частная функция желательности;  $\gamma_i$  – весовой коэффициент, учитывающий категорию токсичности сточных вод и позволяющий расширить динамический диапазон рассчитываемого показателя.

При расчете частной функции желательности для оценки токсических свойств вод приняты следующие обозначения:  $x_i$  – значение безвредной кратности разбавления (БКР) пробы исследуемых сточных вод (Жмур, 1997);  $x_{\text{норм}}$  – минимальное возможное значение – БКР<sub>мин</sub>.

Поскольку в соответствии с нормативными требованиями БКР<sub>мин</sub> = 1 (т.е. исследуемая сточная вода не требует разведения), то формула расчета частной функции желательности приобретает следующий вид:

$$d_i = \frac{2x_i}{x_i^2 + 1}. \quad (5)$$

Введение в формулу (4) весового коэффициента  $\gamma_i$  позволяет расширить динамический диапазон ОФЖ, что дает возможность сравнивать между собой интегральные показатели качества вод по химическим и токсикологическим свойствам в сопоставимом масштабе. Численные значения коэффициента  $\gamma_i$  соответствуют принятым категориям токсичности сточных вод (Инструкция..., 1998). По степени токсичности сточные воды классифицируются на 5 категорий: 1) нетоксичная (не требующая разбавления), 2) малотоксичная (требуемая кратность разбавления 1.1 – 16 раз), 3) среднетоксичная (кратность разбавления 16 – 50 раз), 4) высокотоксичная (кратность разбавления 50 – 99 раз), 5) гипертоксичная (требуемая кратность разбавления свыше 99 раз). В соответствии с принятой классификацией значения весового коэффициента  $\gamma_i$  для сточных вод разных категорий изменяются от 1 (нетоксичные) до 5 (гипертоксичные).

Очевидно, что с ростом токсичности сточных вод, сопровождающейся увеличением значения весового коэффициента  $\gamma_i$ , величина соответствующей частной функции желательности будет уменьшаться, что приведет в итоге и к снижению величины ОФЖ.

### Квалификационная оценка качества сточных вод

Квалификационная оценка качества сточных вод, основанная на значениях ОФЖ, заданной на интервале (0;1), может быть произведена по категориям качества, диапазоны которых, приведенные в табл. 2, выбраны с использованием функции желательности Харрингтона (Адлер и др., 1976).

Таким образом, предложенные алгоритмы позволяют провести комплексную оценку химической опасности и токсичности сточных вод в единой безразмерной шкале, что дает возможность сравнитель-

**Таблица 2**

Категории качества сточных вод по значению обобщенной функции желательности

Качество сточных вод	Обобщенная функция желательности
Очень хорошее	1.00 – 0.80
Хорошее	0.80 – 0.63
Удовлетворительное	0.63 – 0.37
Плохое	0.37 – 0.20
Очень плохое	0.20 – 0.00

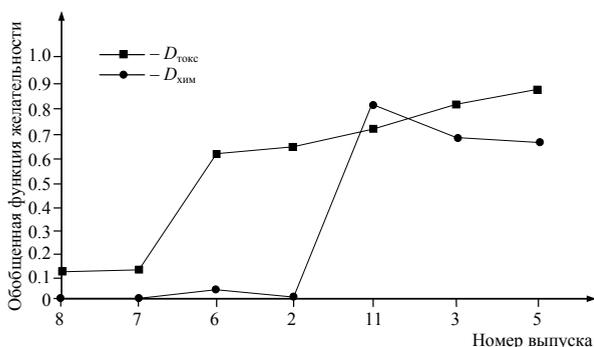
ного анализа качества сточных вод как разных предприятий, так и организованных выпусков сточных вод одного предприятия.

### Применение обобщенной функции желательности для комплексной оценки качества сточных вод промышленного предприятия

На первом этапе натуральные значения химических показателей сточных вод для каждого выпуска предприятия за период 2003 – 2007 гг. были преобразованы по формуле (2) в безразмерные значения частных функций желательности. Затем на их основе по формуле (1) были рассчитаны значения ОФЖ качества сточных вод по химическому составу для каждого выпуска.

На следующем этапе аналогичная процедура была проведена для данных по токсичности сточных вод, полученных в процедуру биотестирования на инфузориях. Натуральные значения БКР проб исследуемых сточных вод с помощью формулы (5) были перекодированы в соответствующие значения частных функций желательности и затем с их помощью по формуле (4) были рассчитаны значения ОФЖ качества сточных вод по токсичности для этих же выпусков.

Таким образом, для каждого из семи обследованных выпусков сточных вод были получены значения ОФЖ для комплекса химических показателей ( $D_{хим}$ ) и соответствующих параметров токсичности ( $D_{токс}$ ) (рисунок). Как следует из полу-



ченных значений ОФЖ, например, для комплекса химических показателей ( $D_{хим}$ ), качество сточных вод, оцениваемое по категориям, приведенным в табл. 2, оценивается от «очень плохого» (выпуски 8; 7; 6 и 2) до «очень хорошего» (выпуски 11; 3 и 5).

Для оценки связи между интегральными показателями токсичности ( $D_{токс}$ ) и химического состава ( $D_{хим}$ ) сточных вод для всех исследуемых выпусков был рас-

считано соотношение усредненных значений ОФЖ по токсичности вод на основе биотеста на инфузориях ( $D_{токс}$ ) и химического состава вод ( $D_{хим}$ ) за 2003 – 2007 гг.

Значение коэффициента ранговой корреляции Спирмена. Значение коэффициента корреляции равно  $0.82$  ( $p < 0.05$ ) свидетельствует о тесной связи результатов определения токсичности сточных вод и их химического состава, выраженных в интегральных показателях. В то же время анализ материалов, представленных на рисунке, позволяет разделить выпуски сточных вод, по крайней мере, на три группы, различающиеся степенью совпадения квалификационных оценок категорий качества сточных вод (см. табл. 2) по значениям  $D_{токс}$  и  $D_{хим}$ . Так, выпуски 8 и 7 согласовано квалифицируются «очень плохим» качеством сточных вод как по токсичности, так и по химическому составу. В выпусках 11, 3 и 5 качество сточных вод по токсичности и химическому составу также согласовано квалифицируются

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

как «очень хорошее». Напротив, в выпусках 6 и 2 наблюдаются так называемые «ножницы»: при «очень плохом» качестве сточных вод по показателю химического состава ( $D_{\text{хим}}$ ), по токсичности ( $D_{\text{токс}}$ ) их качество квалифицируется как «хорошее».

Ретроспективный анализ организации технологических процессов на предприятии показывает, что выпуски 3, 5 и 11 отводят в основном ливневые и производственно-ливневые сточные воды, характеризующиеся небольшим содержанием загрязняющих веществ и низкой токсичностью, что объясняет согласованность квалификационных оценок качества сточных вод. Через выпуски 6, 7 и 8 сбрасывают недостаточно очищенные хозяйственно-бытовые стоки после биологической очистки. При этом выпуски 7 и 8 отводят и наиболее токсичные сточные воды. Однако сточные воды выпуска 6 смешиваются с практически не токсичными производственными сточными водами от охлаждения оборудования, что в итоге обеспечивает низкую токсичность сточных вод этого выпуска. Таким образом, квалификационные оценки качества сточных вод этих выпусков также являются логически непротиворечивыми.

Выпуск 2 стоит в обсуждаемом ряду особняком. Через этот выпуск отводят производственные многокомпонентные стоки, содержащие большой перечень тяжелых металлов (медь, железо, цинк, никель, хром, свинец и др.). Известно, что токсичность тяжелых металлов характеризуется комбинированным действием, включающим как аддитивные, так и антагонистические эффекты (Сейсума и др., 1990; Гелашвили и др., 2000; Яковлев и др., 2000; Жмур, 2003). Можно предположить, что «ножницы», наблюдаемые в качестве сточных вод по показателям  $D_{\text{хим}}$  и  $D_{\text{токс}}$  могут быть обусловлены антагонистическими эффектами, в частности между катионами меди и железа (Гелашвили и др., 2000), цинка и никеля (Жмур, 2003).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог проведенным исследованиям можно заключить, что предлагаемые алгоритмы применения ОФЖ для комплексной оценки качества сточных вод как многокомпонентных систем, являются достаточно эффективными. Введение весовых коэффициентов при расчете обобщенной функции желательности позволило повысить степень дискриминации сравниваемых проб сточных вод как по их химическому составу, так и токсичности. Применение ОФЖ позволяет сравнивать качество сточных вод в едином масштабе, проводить ретроспективный анализ эффективности их очистки, выявлять причины и источники, вызывающие отклонение качества сточных вод от нормативных показателей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.

Баканов А.И. Использование комбинированных индексов для мониторинга пресноводных водоёмов по зообентосу // Вод. ресурсы. 1999. Т. 26, №1. С. 108 – 111.

Булгаков Н.Г. Индикация состояния природных экосистем и нормирование факторов окружающей среды. Обзор существующих подходов // Успехи современной биологии. 2002. Т. 122, № 2. С. 115 – 135.

*Воробейчик Е.А., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г.* Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. Екатеринбург: УИФ «Наука», 1984. 280 с.

*Гелашвили Д.Б., Туманов А.А., Безруков М.Е., Лисенкова Н.В., Барина О.К., Крестьянинов Н.П.* Методологические проблемы применения биологических методов в экоаналитике // Журн. аналит. химии. 1999. Т. 54, № 9. С. 909 – 917.

*Гелашвили Д.Б., Безрукова Н.В., Безруков М.Е.* Экоотоксикологический анализ токсигенной нагрузки промышленных предприятий г. Н. Новгорода на водные объекты речного участка Чебоксарского водохранилища // Изв. Самар. НЦ РАН. 2000. Т. 2, № 2. С. 244 – 251.

*Гелашвили Д.Б., Зинченко Т.Д., Выхристюк Л.А., Карандашова А.А.* Интегральная оценка экологического состояния водных объектов по гидрохимическим и гидробиологическим показателям // Изв. Самар. НЦ РАН. 2002. Т. 4, № 2. С. 270 – 276.

*Гелашвили Д.Б., Лисовенко А.В., Зазнобина Н.И., Королев А.А.* Применение обобщенной функции желательности для оценки экологической обстановки на объектах разного масштаба: город, регион // Проблемы регион. экологии. 2009. № 2. С. 83 – 87.

*Жмур Н.С.* Государственный и производственный контроль токсичности вод методами биотестирования в России. М.: АКВАРОС, 1997. 112 с.

*Жмур Н.С.* Технологические и биологические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 2003. 507 с.

*Зинченко Т.Д., Выхристюк Л.А., Шитиков В.К.* Методологический подход к оценке экологического состояния речных систем по гидрохимическим и гидробиологическим показателям // Изв. Самар. НЦ РАН. 2000. Т. 2, № 2. С. 233 – 244.

Инструкция по взиманию платы за сбросы токсичных загрязняющих веществ в окружающую природную среду. Приложение к приказу Госкомэкологии РФ от 15.04.98 № 216.

*Корольев А.А., Розенберг Г.С., Гелашвили Д.Б., Панютин А.А., Иудин Д.И.* Экологическое зонирование территории Волжского бассейна по степени нагрузки сточными водами на основе бассейнового принципа (на примере Верхней Волги) // Изв. Самар. НЦ РАН. 2007. Т. 9, № 1. С. 265 – 269.

Методика определения токсичности воды по хемотаксической реакции инфузорий. ПНД ФТ 14.1:2:3:4.2 – 98 / Гос. комитет по охране окружающей среды РФ. СПб., 1998. С. 1 – 15.

*Новиков Ю.В., Плитман С.И.* Оценка качества воды по комплексным показателям // Гигиена и санитария. 1984. № 11. С. 7 – 11.

*Носов В.Н., Булгаков Н.Г., Максимов В.Н.* Построение функции желательности при анализе данных экологического мониторинга // Изв. РАН. Сер. биол. 1997. № 1. С. 69 – 74.

Перечень рыбохозяйственных нормативов: предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ на воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М.: Госкомрыболовства России, 1999. 304 с.

*Сейсума З.К., Легздина М.Б., Марцинкевича С.Я., Пфейфере М.Ю., Дзерве А.Э.* Комбинированное влияние цинка и меди, ртути и кадмия на планктон в экспериментальных условиях *in situ* // Экспериментальная водная токсикология. 1990. Вып. 14. С. 202 – 215.

*Федоров В.Д., Сахаров В.Б., Левич А.П.* Количественные подходы к проблеме оценки нормы и патологии экосистем // Человек и биосфера. М.: Изд-во МГУ, 1981. Вып. 6. С. 3 – 42.

*Фрумин Г.Т., Баркан Л.В.* Комплексная оценка загрязненности Ладожского озера по гидрохимическим показателям // Водн. ресурсы. 1997. Т. 24, № 1. С. 315 – 319.

*Фрумин Г.Т.* Экологически допустимые уровни воздействия металлами на водные экосистемы // Биол. внутренних вод. 2000. № 1. С. 125 – 134.

*Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д.* Количественная гидроэкология: методы, критерии, решения: В 2 кн. М.: Наука, 2005. Кн. 1. 281 с.; Кн. 2. 337 с.

*Яковлев А.М., Зайнулгабидинов Э.Р., Кузнецова Т.В.* Экспериментальная оценка токсических взаимодействий тяжелых металлов: *Daphnia magna* Strauss // Вода: экология и технология «Экватек-2000»: Тез. докл. 4-го Междунар. конгресса. М., 2000. С. 206.