

УДК 543.3

## НОРМИРОВАНИЕ СУММАРНОГО СОДЕРЖАНИЯ ПРИМЕСЕЙ В ВОДЕ

© 2010 г. О.М. Розенталь<sup>1</sup>, В.Н. Сурсяков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт водных проблем Российской академии наук, Москва

<sup>2</sup> Федеральное государственное учреждение «Уральский центр стандартизации, метрологии и сертификации», г. Екатеринбург

**Ключевые слова:** водопользование, механизм токсического действия, предельно допустимая концентрация (ПДК), вредное воздействие примеси, правило аддитивности, вариабельность, функция плотности, среднеквадратическое отклонение.

Для целей нормирования допустимого содержания в воде нескольких загрязняющих веществ часто используется правило суммирования концентраций в единицах ПДК. В работе показано, что в тех случаях, когда указанные концентрации переменны (испытывают случайные изменения), алгебраическое сложение заменяется правилом суммирования случайных величин. При этом вопрос о приемлемости воды для заданных целей водопользования решается с учетом риска нарушения установленных нормативов, который в рассмотренных примерах оказался равен 50 % и более.



О.М. Розенталь



В.Н. Сурсяков

Проблема обеспечения безопасного водопользования становится тем острее, чем больше загрязняющих веществ обнаруживается в природных водах. Широко известно требование о том, что «в случае присутствия в воде водного объекта двух и более веществ 1 и 2 классов опасности, характеризующихся однонаправленным механизмом токсического действия, в т. ч. канцерогенных, сумма отношений концентраций каждого из них к соответствующим предельно допустимым концентра-

Водное хозяйство России № 1, 2010

# Водное хозяйство России

циям (ПДК) не должна превышать единицу» [1]. При рыбохозяйственном водопользовании для многих веществ одинакового класса опасности и однонаправленного механизма токсического действия используется выражение:

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1, \quad (1)$$

где  $C_i$  и  $\text{ПДК}_i$  — соответственно, фактическая в контрольном створе и предельно допустимые концентрации  $i$ -го компонента;  
 $n$  — число компонентов с одинаковым лимитирующим признаком вредности.

Очевидна ограниченность применяемого правила из-за возможных эффектов взаимного синергетического влияния, кумулятивности, ингибирования и других малоизученных эффектов. Например, внесение отдельных металлов 2-го класса опасности в количестве до 2 ПДК в культуру водорослей хлореллы, сценедесмуса и других не оказывает заметного влияния, тогда как их смесь сильно подавляет рост клеток даже при более низких концентрациях. Однако, хорошо известно аддитивное влияние загрязняющих веществ на организмы (так называемый «эффект биологической суммации»), если эти вещества характеризуются однонаправленным и равносильным воздействием на экосистемы [2]. Таковы примеры совместного влияния ряда высокотоксичных металлов, обусловленные антагонизмом катионов. Так, свинец — известный нейротоксин, является антагонистом кальция. Он вытесняет кальций из некоторых отделов нервной системы, препятствуя тем самым выделению нейромедиаторов. Аналогично действует кадмий. В 1960 г. широко распространившееся загрязнение восточного побережья Японии свинцом и кадмием в сочетании с низким уровнем поглощения кальция привело к развитию у людей мучительной болезни — одной из разновидностей остеомиелита. Выяснилось, что причиной этого заболевания является антагонизм суммы металлов (свинца, кадмия) и кальция. Подобные эффекты вредного воздействия примеси в смеси токсикантов наблюдались и в отношении селена. Можно уверенно предположить, что перечисленные металлы — свинец, кадмий и селен — оказывают аналогичное действие на организм. В то же время они могут вместе присутствовать в природных водных объектах рыбохозяйственного значения и источниках питьевой воды индустриально развитых регионов России. В этих случаях, даже при выдерживании норм ПДК по отношению к каждому из металлов в отдельности, опасность их суммарного влияния может быть действительно

обусловлена правилом аддитивности. В то же время суммирование концентраций, выраженных в единицах ПДК (1), принятое при ограничении содержания примесей в воде [3—7], воздухе рабочей зоны и населенных пунктах [8], а также в других средах, справедливо только в том случае, если  $C_i$  — постоянные величины. В действительности это очень часто не так. По данным Комитета 147 «Качество воды» Международной организации по стандартизации [9] случайные колебания концентрации загрязняющих веществ в воде многих природных водных объектов в пределах  $\pm 15\%$  возникают ежесекундно. Наблюдаются и более резкие колебания, поэтому учет аддитивного влияния загрязняющих веществ требует использования правила сложения случайных величин, предполагающего знание функций их распределения [10, 11].

Формальное выражение рассматриваемого правила аддитивности введем сначала для двух загрязняющих веществ. Обозначим концентрации этих веществ, выраженные в безразмерных единицах предельно допустимой концентрации, как  $X$  и  $Y$ ; эти величины изменяются в диапазоне от 0 до 1, если соответствующая истинная концентрация равна произведению  $X \cdot \text{ПДК}_x$  и  $Y \cdot \text{ПДК}_y$ . Пусть введенные концентрации независимы и распределены по законам, описываемым, соответственно, функциями  $f_1(x)$  и  $f_2(y)$ . Тогда суммарная концентрация  $W = X + Y$  распределена по закону  $g(w)$ , определяемому на основе функции распределения  $G(w)$ :

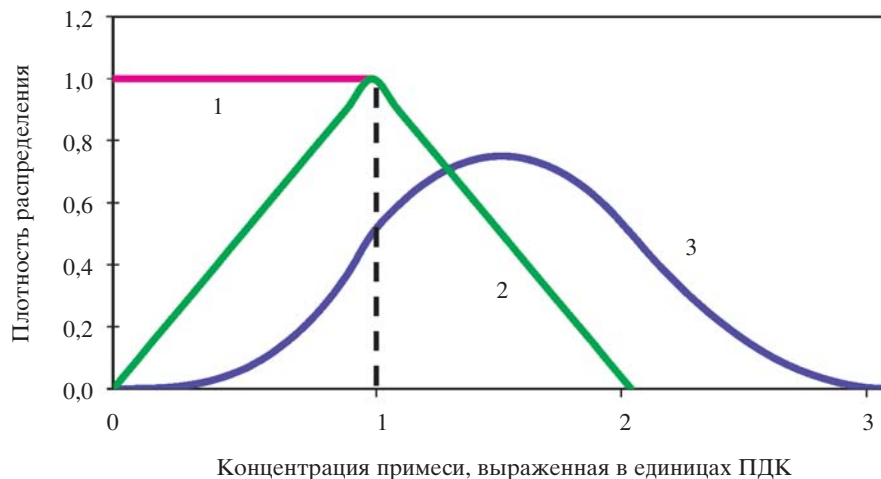
$$g(w) = G'(w), \quad (2)$$

$$G(z) = \int_0^{w \pm x} \int_0^w f_1(x) f_2(y) dx dy. \quad (3)$$

Здесь  $W$  — величина случайная и ее значение не может быть ограничено детерминированным порогом — единицей, как в выражении (1). По результатам измерений можно лишь оценить вероятность

$$P = \int_0^1 g(w) dw \quad (4)$$

того, что  $W$  не превышает указанную единицу или другую установленную величину. Так, для карповых хозяйств допустимо использование воды, в которой сумма концентраций в единицах ПДК достигает 3, а для форелевых хозяйств эта величина должна быть 0,67; при этом в расчет принимаются четыре показателя: аммиак, нитритный азот, аммоний-



**Рис.** Плотность распределения концентраций отдельных загрязняющих веществ (1) и совокупные плотности для двух (2) и трех (3) веществ.

ный азот и железо. Далее, в зависимости от полученного результата, следует решить, приемлем ли исследуемый водный объект для целей водопользования.

Пусть, например, в серии измерений установлено, что концентрации  $X$  и  $Y$  с одинаковой частотой приобретают значения в пределах от 0 до 1, т. е. не превышают ПДК. Это означает, что функция распределения концентраций обоих веществ равномерная, равная единице в указанном диапазоне концентраций и нулю вне этого диапазона (линия 1 на рисунке). Согласно (2) и (3) в этом случае суммарная концентрация  $W$  описывается треугольным распределением (линия 2), причем,  $P = 0,5$ . Следовательно, установленное требование  $X + Y \leq 1$  нарушается в 50 % случаев. Вопрос о том, целесообразно ли при этом водопользование, определяет лицо, принимающее решения.

Для получения более полной информации о качестве воды необходим учет других присутствующих в воде компонентов. Чтобы продемонстрировать алгоритм такой работы, примем, что в воде присутствует третье загрязняющее вещество  $Z$ , концентрация которого, как и первых двух, подчиняется равномерному закону  $f_3(y)$ . Новую (трехкомпонентную) функцию распределения находим по формулам, аналогичным (2) и (3). Ее графический вид на рисунке (кривая 3) напоминает функцию нормального распределения (при увеличении числа слагаемых компонентов это сходство усиливается), причем, как нетрудно убедиться, появление третьего загрязняющего

вещества повышает риски нарушения установленных требований почти на 20 %.

В заключение для уже упоминавшихся загрязняющих веществ: свинца, кадмия и селена, применим введенное правило суммирования концентраций (2) и (3) и оценим вероятность (4) соответствия качества воды установленным требованиям.

#### Пример 1

В результате исследований проб подземной воды из скважин на содержание свинца (индекс 1) и кадмия (индекс 2) было установлено, что концентрацию этих веществ можно описать следующими равномерными функциями:

$$f_1(x) = \begin{cases} 0, & x < 0,6, \\ 1, & 0,6 \leq x \leq 1,6, \\ 0, & x > 1,6 \end{cases}$$

и

$$f_2(y) = \begin{cases} 0, & y < 0,1, \\ 10, & 0,1 \leq y \leq 0,2, \\ 0, & y > 0,2. \end{cases}$$

*Требуется:*

а) Оценить риск забора воды несоответствующего качества по суммарному содержанию указанных примесей, принимая, что для них выполняется правило аддитивности.

б) Выяснить возможность снижения этого риска путем отказа от использования скважин, пробы воды из которых содержат сверхнормативное количество хотя бы одной примеси.

*Решение:*

а) Используя приведенную выше методику расчета, получаем:

$$g(z) = \begin{cases} 0, & z < 0,7, \\ 10(z \pm 0,7), & 0,7 \leq z \leq 0,8, \\ 1, & 0,8 < z < 1,7, \\ 10(1,8 \pm z), & 1,7 \leq z \leq 1,8, \\ 0, & z > 1,8. \end{cases}$$

Следовательно, вероятность того, что случайно выбранная партия воды из скважин удовлетворяет установленным требованиям, равна:

$$P\{0 < z < 1\} = 0,25,$$

а риск несоответствия  $1 - P = 0,75$ .

б) По действующей методике из проекта исключаются скважины, часть проб воды из которых содержала концентрацию свинца больше 1 (в единицах ПДК). Это соответствует усечению распределения  $f_1(x)$  до единицы. Нетрудно видеть, что после такого усечения получаем следующие результаты:

$$g(z) = \begin{cases} 0, & z < 0,7, \\ 25(z \pm 0,7), & 0,7 \leq z \leq 0,8, \\ 2,5, & 0,8 < z < 1,1, \\ 25(1,2 \pm z), & 1,1 \leq z \leq 1,2, \\ 0, & z > 1,2. \end{cases}$$

Следовательно, новые значения искомых величин  $P\{0 < z < 1\} = 0,625$ ,  $1 - P = 0,375$ .

Как видно, исключение из водопользования  $100 \cdot (1,6 - 1,0)/(1,6 - 0,6) = 60$  (%) наиболее «опасных» скважин позволило существенно снизить риск получения воды несоответствующего качества. Налицо высокий, хотя далеко не полный, эффект повышения безопасности водопользования. Однако, как видно из следующего примера, такой результат получается не всегда.

### Пример 2

Анализировалась еще одна группа скважин на их соответствие установленным требованиям по совместному содержанию свинца (1) и селена (2). Оказалось, что концентрация этих металлов может быть описана следующими функциями:

$$f_1(x) = \begin{cases} 0, & x < 0,6, \\ 2, & 0,6 \leq x \leq 1,1, \\ 0, & x > 1,1 \end{cases}$$

и

$$f_2(y) = \begin{cases} 0, & y < 0,3, \\ 5, & 0,3 \leq y \leq 0,5, \\ 0, & y > 0,5. \end{cases}$$

Требуется выполнить те же задания, что и в примере 1. По вышеприведенной методике получаем:

$$g(z) = \begin{cases} 0, & z < 0,9, \\ 10(z \pm 0,9), & 0,9 \leq z \leq 1,1, \\ 2, & 1,1 < z < 1,4, \\ 10(1,6 \pm z), & 1,4 \leq z \leq 1,6, \\ 0, & z > 1,6. \end{cases}$$

Вероятность того, что вода окажется установленного качества, здесь незначительна:

$$P\{0 < z < 1\} = 0,05.$$

Выясним, насколько улучшится этот результат после исключения из водопользования скважин, где вода не соответствует установленным требованиям по содержанию свинца. Выполнив усечение распределения  $f_1(x)$  до единицы, получаем следующие результаты:

$$g(z) = \begin{cases} 0, & z < 0,9, \\ 12,5(z \pm 0,9), & 0,9 \leq z \leq 1,1, \\ 2,5, & 1,1 < z < 1,3, \\ 12,5(1,5 \pm z), & 1,3 \leq z \leq 1,5, \\ 0, & z > 1,5. \end{cases}$$

При этом  $P\{0 < z < 1\} = 0,0625$ , т. е. искомая величина практически не изменилась.

Из приведенных примеров видно, что выбор водоисточников путем исключения из рассмотрения тех из них, которые содержат воду несоответствующего качества, не обязательно эффективен. Суммарное содержание примесей все равно может остаться сверхнормативным. Поэтому важен корректный переход от оценки риска водопользования по отдельным факторам к оценке многофакторного риска, что отвечает требованиям 184-ФЗ «О техническом регулировании». Представленные результаты показывают, что применение выражения (1) вместо (2) и (3) может привести к признанию соответствующими установленным требованиям вод, для которых вероятность несоответствия 50 % и более из-за совместного влияния сопряженных факторов. В то же время, если при современном уровне водно-экологического мониторинга не удастся установить функцию распределения контролируемых показателей, можно складывать осредненные величины эффективных концентраций за-

грязняющих веществ. Но и в этом случае необходимо оценивать риски ошибочного нормирования, для чего определять показатели вариабельности (изменчивости) установленных нормативов. Если, например, известны среднеквадратические отклонения концентраций каждого загрязняющего вещества от их математического ожидания, то тогда легко найти искомый риск как корень квадратный из суммы квадратов среднеквадратических отклонений концентраций.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПиН 2.1.5.980-00. Санитарные правила и нормы. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Утв. гл. госуд. санитар. врачом РФ 22 июня 2000 г., введен 1 января 2001 г.
2. Юрин В.М. Основы ксенобиологии. Минск: ООО «Новое знание», 2002. 267 с.
3. Проект ПРООН, Глобального Водного Партнерства: «Национальный и бассейновые планы интегрированного управления водными ресурсами; План эффективного использования воды».
4. Методика разработки нормативов допустимого воздействия веществ и материалов в водные объекты для водопользователей. Утв. приказом МПР России 17.12.07 № 333, зарег. в Минюсте РФ 21.02.08 № 11198.
5. СанПиН 2.1.4.1116-02. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды, расфасованной в емкости. Контроль качества. Утв. гл. госуд. санитар. врачом РФ 15 марта 2002 г., введен 1 июля 2002 г.
6. Методические указания по установлению эколого-рыбохозяйственных нормативов (ПДК и ОБУВ) загрязняющих веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. М., ВНИРО, 1998.
7. ОСТ 15.372-87. Охрана природы. Гидросфера. Вода для рыбоводных хозяйств. Общие требования и нормы. 1988.
8. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Утв. гл. госуд. санитар. врачом РФ 31 мая 2003 г., зарег. в Минюсте РФ 19 мая 2003 г. № 4568.
9. Walker D. Accuracy and precision in sampling water. ISO Focus. 2006. № 6. P. 21—24.
10. Александровская Л.Н., Розенталь О.М. Рекомендации по использованию стандарта ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002 // Законодательная и прикладная метрология. 2009. № 1. С. 17—20.
11. Розенталь О.М., Копнова Е.Д. Модель управления производственным процессом с учетом его перенастройки // Экономика и математические методы. Т. 43. № 1. С. 129—132.

#### Сведения об авторах:

Розенталь Олег Моисеевич, д. т. н., профессор, главный научный сотрудник Института водных проблем РАН, Москва, (495) 771-66-52, mos@mirq.ru;

Суряков Валентин Николаевич, к. т. н., профессор, генеральный директор ФГУ «Уральский центр стандартизации, метрологии и сертификации» (УРАЛТЕСТ), г. Екатеринбург, secretary@uraltest.ru.