

УДК 543.3:574

КОНТРОЛЬ ВОДООТВЕДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

© 2011 г. О.М. Розенталь¹, С.В. Михеева²

¹ Институт водных проблем Российской академии наук, Москва

² Межрегиональное территориальное управление Росстандарта, г. Екатеринбург

Ключевые слова: сброс загрязняющих веществ, контроль водоотведения, природный фон, изменчивость контролируемых показателей, «решающее правило», статистическая оценка.

Исследована задача контроля статистически стабильного сброса сточных вод путем измерительного контроля на створах. Предложена методика коррекции водоотведения в условиях изменчивости контролируемых показателей вод. Введено «решающее правило», позволяющее с заданным уровнем надежности заключить, удерживается ли концентрация загрязняющего вещества в сточных водах на уровне природного фона. Для практического использования, в том числе с целью выявления случайных кратковременных нарушений режима водоотведения, предложена соответствующая надстройка в Excel.

Предусматривая государственные гарантии охраны водных ресурсов, современное законодательство высвобождает предпринимательскую инициативу «в пределах дозволенного» (184-ФЗ «О техническом регулировании»). При этом предприятию в условиях нарастающих сумм экологических платежей за сверхнормативные сбросы (проект ФЗ «О внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ в части совершенствования нормирования в области охраны окружающей среды»), не выгоден ни сверхнормативный сброс, ни его избыточное ограничение. Если, например, технология предполагает отведение в водный объект 10 кг загрязняющего вещества на тонну продукции, то для производства 100 т сброс составит 1 т. Получив задание на выпуск указанных 100 т и соответствующее разрешение на сброс 1 т загрязняющих веществ, предприятие не может сбросить меньше без нарушения технологии. В этих условиях надежный производственный контроль становится важнейшим фактором корректного водопользования, обеспечивающим экономически удовлетворительный и экологически приемлемый режим производства. Однако на практике такой контроль затруднителен из-за

Водное хозяйство России № 4, 2011

Водное хозяйство России

изменчивости (непостоянства статистической природы) контролируемых показателей.

Учет изменчивости показателей качества вод

Пусть организованный сброс загрязняющих веществ в водный объект (водоток) ограничен требованием сохранения (отсутствия изменений в среднем) качества природных вод. Тогда контроль сводится к сопоставлению химического состава воды в пробах, отобранных на фоновом и контрольном створах — выше точки сброса для оценки фонового качества воды [1, 2] и ниже ее (там, где сточные воды не менее, чем на 80 % смешиваются с природной), в зоне «гарантированного смешения» [3]. Сравнение качества воды на двух створах (фоновом и контрольном) в принципе позволяет судить о характере и интенсивности отведения загрязняющих веществ: если это качество в потоке между створами не снижается, то установленное требование выполнено. В противном случае происходит сверхнормативный сброс.

Трудность такого сравнения связана с тем, что из-за изменчивости мгновенных значений концентрации загрязняющего вещества на фоновом створе (C_1) и в точке сброса (C_2) возникают «ошибки выборки» [4] статистической природы, причем, указанные величины практически невозможно непрерывно удерживать на постоянном уровне, вследствие чего концентрация на контрольном створе (C) может оказаться как больше, так и меньше C_1 [5].

Предприятие не заинтересовано ни в сверхнормативных сбросах, ни в излишнем их ограничении — в обоих этих случаях возникают дополнительные издержки (из-за санкций Госконтроля в первом случае и из-за расходов на излишнюю доочистку сточных вод — во втором). Поэтому коррекция водоотведения в этом случае сводится к уравниванию средних концентраций (математических ожиданий для плотностей распределения соответствующих вероятностей [4, 5]). Скорость сброса не имеет значения [5].

На практике задача сводится к принятию решения: «процесс водоотведения налажен» или «процесс разлажен». Критерием налаженного процесса водоотведения является условие:

$$\Delta = C - C_1 = 0. \quad (1)$$

При этом моменты отбора проб воды для измерения в двух створах при необходимости согласовываются с учетом «времени добегания», например, равному 1 часу при гидравлическом уклоне ложа реки 0,0004 и расстоянии между створами 2 км [7].

Учитывая случайность величин S и S_1 , проверку условия (1) следует осуществлять с учетом дисперсии Δ , т. е. использовать статистические оценки $\bar{\Delta}$, $\sigma^2(\bar{\Delta})$.

Для нормальных плотностей распределения проверка статистической гипотезы (1) осуществляется по «решающему правилу»

$$\frac{|\bar{\Delta}|}{S/\sqrt{n}} \leq t_{1-\alpha/2}(n-1), \quad (2)$$

где $t_{1-\alpha/2}$ — квантиль t -распределения Стьюдента с $(n-1)$ степенями свободы уровня значимости $\alpha/2$.

Конечно, легко допустить, что показатели качества воды в водных объектах не подчиняются нормальному распределению. Отметим, что в условиях малых выборок, при которых между минимальным и максимальным выборочными значениями заключена лишь малая доля распределения, выявить отклонения от нормального закона распределения, а тем более определить истинный закон, невозможно. В то же время многие законы оказываются одинаково «хорошими» с точки зрения критериев согласия. Таковы, например, χ^2 -критерий Пирсона или контрольные карты Шухарта [5, 6]; при этом нормальный закон представляет собой аппроксимацию, наиболее удобную для практического использования.

В неравенстве (2) нахождение величины $\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i$ и ее дисперсии

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2$$
 осуществляется по данным гидрохимических изме-

рений. Например, для результатов наблюдений, приведенных на рис. 1, имеем: $\bar{\Delta} = 0,15$; $S^2 = 1,93$; $S = 1,4$, $n = 27$. Следовательно, в данном случае

$$\text{левая часть неравенства (2) есть } \frac{|\bar{\Delta}|}{S/\sqrt{n}} = \frac{0,15}{1,4/\sqrt{27}} = 0,56.$$

Для того чтобы выяснить налажен или разлажен при этом процесс водоотведения, необходимо установить, удовлетворяет ли полученный результат неравенству (2). С этой целью сопоставляем его с квантилем t -распределения Стьюдента при заданном количестве измерений $n = 27$. Значения искомого квантиля при различных уровнях значимости $\alpha/2$ приведены в табл. 1. Используя ее, заключаем, что условие (2) выполняется уже при $\alpha/2 = 0,25$, что свидетельствует о высокой достоверности принимаемого решения [6].

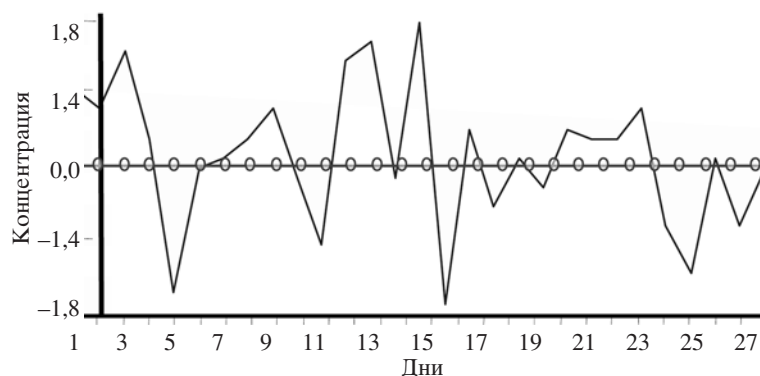


Рис. 1. Изменчивость разности концентраций $(C - C_1)/\text{ПДК}$ меди в водах контрольного и фоновых створов (р. Исеть, г. Каменск-Уральский, июнь 2007 г., ежедневные измерения).

При практической работе удобно использовать разработанную авторами надстройку для Excel. Представление о ней дает пример, приведенный в левой части табл. 2. В первые 2 столбца автоматически или вручную вносятся исходные данные C_i и C_{1i} (в данном случае $n = 36$). Необходимые вычисления выполняются автоматически после нажатия на виртуальную клавишу «Рассчитать»: в третьем столбце появляются значения $\Delta_i = C_i - C_{1i}$, а в 4—5 — значения всех исходных данных — n , $\bar{\Delta}$, S для проверки статистической гипотезы (1) по «решающему правилу» (2) и на этом основании — вывод 1: значимые сбросы имеются/отсутствуют для принятого уровня значимости. При этом, в приведенных справочно столбцах появляется затемненная строка, содержащая данные, на основе которых сделан вывод 1 (в примере — это первая строка).

Описанная часть табл. 2 (слева от разделительной полосы) позволяет оценить экологическую безопасность в среднем. Однако возможны «сбросы» — кратковременные нарушения режима водоотведения. Их учет на основе методики [8, 9], в том числе в автоматическом режиме, описан ниже.

Таблица 1. Квантили t -распределения Стьюдента со степенями свободы $(n - 1) = 26$ при различных уровнях значимости $\alpha/2$

$\alpha/2$	0,4	0,25	0,1
$t_{1-\alpha/2}$	0,256	0,684	1,31

Таблица 2. Пример автоматизированной оценки водоотведения в зависимости от мгновенных измеренных в единицах ПДК концентраций загрязняющего вещества в фоновом и контрольном створах

C_1	C	Δ_i	Рассчитать		Проверка на наличие сбросов при принятых исходных данных $\Delta_{\max} = 2$ $\frac{\Delta_{\max} - \bar{\Delta}}{S} = 2,324$ Вывод 2: значимые сбросы отсутствуют уже при $\alpha = 0,05$
4	4	0			
3	4	1			
3	4	1	n	36	
2	1	-1	$\bar{\Delta}$	0,28	
5	4	-1	S^2	0,55	
3	4	1	S	0,74	
5	5	0			
8	8	0			
1	2	1			
2	3	1	$\frac{ \bar{\Delta} }{S/\sqrt{n}} = 2,25.$		
4	4	0			
7	6	-1	Вывод 1: статистическая гипотеза выполняется при $\alpha/2 = 0,01$		
4	5	1			
3	3	0			
5	6	1			
			Справочно: квантиль t -распределения Стьюдента		
7	7	0	$\alpha/2$	t	
3	3	0	0,01	2,438	
4	5	1	0,05	1,690	
4	4	0	0,1	1,306	
3	4	1	0,15	1,052	
3	4	1	0,2	0,852	
2	1	-1	0,25	0,682	
5	4	-1	0,3	0,529	
3	4	1	0,35	0,388	
5	5	0	0,4	0,255	
8	8	0	0,45	0,127	
1	2	1			
2	3	1			
4	4	0			
7	6	-1			
4	5	1			
3	3	0			
5	6	1			
7	7	0			
3	3	0			
4	5	1			
					Справочно: критический критерий Граббса
			n	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,05$
			12	2,636	2,412
			13	2,699	2,462
			14	2,755	2,507
			15	2,806	2,549
			16	2,852	2,585
			17	2,894	2,62
			18	2,932	2,651
			19	2,968	2,681
			20	3,001	2,709
			21	3,031	2,733
			22	3,06	2,758
			23	3,087	2,781
			24	3,112	2,802
			25	3,135	2,822
			26	3,157	2,841
			27	3,178	2,859
			28	3,199	2,876
			29	3,218	2,893
			30	3,236	2,908
			31	3,253	2,924
			32	3,27	2,938
			33	3,286	2,952
			34	3,301	2,965
			35	3,316	2,979
			36	3,33	2,991

Проверка на наличие сбросов

В случае анализа разности между независимыми измерениями на двух створах указанная задача может быть решена с использованием критерия Граббса [8]:

$$\frac{\Delta_{\max} - \bar{\Delta}}{S} \leq G_{\alpha}(p), \quad (3)$$

где $G_{\alpha}(p)$ — критическое значение критерия Граббса, численные значения которого в зависимости от $p = n$ в диапазоне от 3 до 36 и $\alpha = 0,05; 0,01$ приведены в разделе 8 ГОСТ Р ИСО 5725—2—2002 [8].

В рассмотренном выше примере при $n = 27$ имеем: $G_{0,01}(27) = 3,178$; $G_{0,05}(27) = 2,859$. Из данных, по которым построен рис. 1, следует, что $\Delta_{\max} = 3,2$. Следовательно, $\frac{\Delta_{\max} - \bar{\Delta}}{S} = \frac{3,2 - 0,15}{1,4} = 2,178$, что меньше

$G_{\alpha}(p)$, поэтому в данном случае принимается решение об отсутствии значимых сбросов.

Отметим, что вопрос об отсутствии значимых сбросов по данным табл. 2 не означает, что такой же вывод может быть сделан также и для концентраций C и C_1 по отдельности. На рис. 2 приведена фоновая концентрация меди (C_1) в дни, когда оценивались $(C - C_1)/\text{ПДК}$ (см. рис. 1). Анализ результатов показывает, что здесь максимальное значение кон-

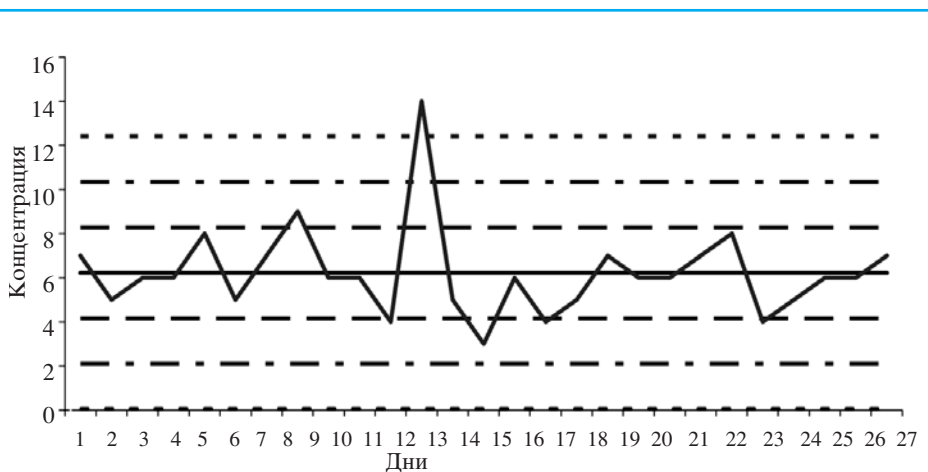


Рис. 2. Концентрация меди на фоновом створе (р. Исеть, г. Каменск-Уральский, июнь 2007 г., ежедневные измерения). Прямыми обозначены: средняя линия (сплошная), и соответствующие S (штриховая), $2S$ (штрихпунктирная) и $3S$ (пунктирная), как это принято в контрольных картах Шухарта [6].

тролируемого показателя было зафиксировано на 12-й день наблюдения, в единицах ПДК на уровне $C_{1\max} = 14$. При этом $\bar{C} = 8,1$, $S = 2,0$, т. е. $\frac{C_{1\max} - \bar{C}}{S} \approx 3$. Эта величина больше критического числа, приведенного

в разделе 5.5.1 РД 52.24.622—2001 [9], которое при $n = 27$ не превышает 2,7. Следовательно, $C_{1\max}$ по терминологии [9] — «непоказательное экстремальное значение», подлежащее исключению из рассматриваемого массива данных. Фактически оказалось — в день «сброса» и в следующий за ним водопользователь испытывал значительные трудности с обеспечением нормативного водоотведения, что зафиксировано в технологическом журнале. Предположительно, это связано с тем, что накануне крупное металлургическое предприятие, расположенное выше по течению, объявило о консервации своего гальванического производства и приступило к промывке оборудования.

Приведенный пример показывает, что факт фиксации сброса, если это не связано с ошибкой измерения, может быть исключительно важен. Например, это может свидетельствовать не о «непоказательном экстремальном значении», а о статистической нестабильности вследствие неординарных техногенных или природных факторов. Нажатие на клавишу «Рассчитать» позволяет получить результат — вывод 2 о наличии/отсутствии «сбросов» в введенном массиве данных (одновременно с ответом на вопрос — выполняется ли статистическая гипотеза (1)). При этом в правой части внизу, в приведенных справочно данных, появляется затемненная строка, содержащая данные, на основе которых приведен вывод 2 (в примере — это последняя строка).

Учет вновь появляющейся информации

Приведенные в предыдущем примере оценки $\bar{\Delta}$, S^2 получены по выборке полного объема наблюдений n . Предполагалось, что оценка осуществляется после накопления необходимой информации. В практике контроля качества вод удобнее использовать рекуррентные оценки [6], получаемые в процессе поступления новой измерительной информации, по мере чего исключаются «наиболее устаревшие» данные.

С этой целью произведем преобразование среднеарифметической

оценки $\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i$, а именно:

$$\bar{\Delta}_n = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^{n-1} \Delta_i + \Delta_n \right) = \frac{n-1}{n} \bar{\Delta}_{n-1} + \frac{\Delta_n}{n} + \bar{\Delta}_{n-1} - \bar{\Delta}_{n-1} = \bar{\Delta}_{n-1} + \frac{\Delta_n - \bar{\Delta}_{n-1}}{n}. \quad (4)$$

В результате при переменном n получаем следующий рекуррентный алгоритм: оценка по n измерениям равна оценке по $n - 1$ измерениям с учетом корректирующего слагаемого, представляющего собой разницу между n -м измерением и предыдущей оценкой с весовым коэффициентом $1/n$.

Для получения рекуррентной оценки дисперсии удобнее воспользоваться соотношением $S_n^2 = \bar{\epsilon}_n^2 + \bar{\Delta}_n^2$, где средний квадрат

$$\bar{\epsilon}_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \bar{\epsilon}_{n-1}^2 + \frac{\Delta_n^2 - \bar{\epsilon}_{n-1}^2}{n-1}. \quad (5)$$

Проверку наличия кратковременных сбросов в этом случае следует проводить по критерию Томпсона для каждого последующего измерения

$$W = \frac{|\Delta_n - \bar{\Delta}_{n-1}|}{S_{n-1}}. \quad (6)$$

Нетрудно показать, что эта статистика имеет t -распределение Стьюдента с $(n - 2)$ степенями свободы, скорректированное на множитель

$$\sqrt{\frac{n}{n-1}}.$$

Таким образом, при выполнении условия

$$W \leq t_{1-\alpha/2}(n-2) \quad (7)$$

n -е измерение считается принадлежащим исследуемой выборке и включается в последующие оценки $\bar{\Delta}_n, \bar{S}_n^2$. В противном случае оно считается сбросом.

Обычно изменение концентрации загрязняющих веществ в водном потоке является нестационарным случайным процессом (см., например рис. 3 в [5]). Корректирующее же слагаемое в выражениях (4), (5) уменьшается с ростом объема выборки n , т. е. нестационарность практически не учитывается.

Для преодоления этого ограничения используются некоторые модификации оценок (4), (5). Простейшими из них являются оценки вида

$$\bar{\Delta}_n = \bar{\Delta}_{n-1} + \frac{\Delta_n - \bar{\Delta}_{n-1}}{a}; \quad \bar{\epsilon}_n^2 = \bar{\epsilon}_{n-1}^2 + \frac{\Delta_n^2 - \bar{\epsilon}_{n-1}^2}{a}, \quad \text{где } a = \text{const}$$

представляет собой так называемый «оператор экспоненциального сглаживания», позволяющий «забывать» прошлые значения.

Действительно, запишем выражение (4) с учетом более ранних измерений:

$$\begin{aligned}\bar{\Delta}_n &= (1-b)\bar{\Delta}_{n-1} + b\Delta_n = b\Delta_n + (1-b)[\bar{\Delta}_{n-2} + b(\bar{\Delta}_{n-1} + \bar{\Delta}_{n-2}) + \dots] = \\ &= b\sum_{i=0}^{n-1}(1-b)^i \Delta_{n-i} + (1-b)^n \bar{\Delta}_0,\end{aligned}$$

где $b = \frac{1}{a}$.

Таким образом, оценка $\bar{\Delta}_n$ является линейной комбинацией всех n измерений с весовыми коэффициентами, убывающими по геометрической прогрессии. Так как $(1-b)^i = \exp\{-i\ln(1-b)\}$, данный алгоритм и носит название оператора с «экспоненциальной памятью» [6].

Дисперсия оценки $\bar{\Delta}_n$ в этом случае приблизительно равна $\sigma^2 \frac{b}{2-b}$

или $\sigma^2 \frac{1}{2a-1}$. Напомним, что дисперсия оценки $\bar{\Delta}$ «без сглаживания» составляет σ^2/n .

Параметр сглаживания a можно определить на основе предварительных исследований. Так, из рис. 3 работы [5] видно, что концентрация меди в среднем оставалась постоянной с 1986 по 1991 гг. Если измерения проводились 1 раз в квартал, то объем выборки составил $n = 4 \times 6 = 24$, откуда, приравнявая $n = 2a - 1$, получим $a = 12,5$, $b = 0,08$.

Параметр сглаживания может быть также определен путем обработки текущих измерений в соответствии с правилом (7). Если результаты нескольких измерений подряд отличаются от текущего среднего, то, скорее всего, это не кратковременный сброс, а нарушение стационарности.

Заключение

Решение задачи по корректировке водоотведения требует принятия решений типа «процесс водоотведения налажен» или «процесс разлажен». В условиях пространственно-временной изменчивости контролируемых показателей такие решения целесообразно принимать на основе предложенного «решающего правила» с использованием предложенной надстройки для Excel. Тогда автоматическое введение исходных данных позволяет быстро получать искомые результаты. При этом также проверка на наличие кратковременных сбросов — особо повышенной концентрации загрязняющих веществ — осуществляется с использованием критерия Граббса. Одновременно факты появления таких

«сбросов» могут сигнализировать о статистической нестабильности водной системы вследствие неординарных техногенных или природных факторов.

Показано, что сделанные оценки часто следует осуществлять не после накопления максимальной информации, а в процессе ее поступления с использованием рекуррентных оценок. В этих случаях удобно использование так называемого «оператора экспоненциального сглаживания», позволяющего «забывать» прошлые значения контролируемого показателя.

Изложенный материал представляет собой лишь общую методику коррекции водоотведения в условиях изменчивости контролируемых показателей вод. Для ее практического использования необходим правильный выбор интервала между измерениями в соответствии со стандартом ГОСТ Р ИСО 5725—1—2002 [10]. Кроме того, концентрация загрязняющих веществ в створах должна рассматриваться не как случайная характеристика объекта, а как случайная характеристика процесса [11]. При этом распределения вероятностей концентраций могут меняться в различных временных сечениях (например, день-ночь для предприятия, сезон для природного фона и т. д.), что требует учета и проведения дополнительного исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 52.24.634—2002. Методические указания. Уточнение местоположения створов (пунктов) наблюдений и режимов отбора проб на основе использования трассерных методов. Утв. Росгидрометом 16.05.2002. Введ. 01.01.2003. СПб.: Гидрометеиздат, 2002.
2. РД 52.24.622—2001. Методические указания. Проведение расчетов фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков. Утв. Росгидрометом 01.01.2001. Введ. 01.01.2002. Взамен «Временных методических указаний по расчету фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков». СПб.: Гидрометеиздат, 2001. 61 с.
3. Р 52.24.627—2001. Методы прогностических расчетов распространения по речной сети зон высокозагрязненных вод и использования для прогнозов трассерных экспериментов, имитирующих аварийные ситуации. Утв. Росгидрометом 31.10.2001. Введ. 01.07.2002. Взамен «Усовершенствованных методических рекомендаций по оперативному прогнозированию распространения зон опасного аварийного загрязнения в водотоках и водоемах, а также уровней содержания в воде основных загрязняющих веществ». СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 94 с.
4. Адлер Ю.П., Шпер В.Л. Умеем ли мы измерять? Методы оценки соответствия. 2010. № 2. С. 36—40.
5. Михеева С.В., Розенталь О.М. Контроль водоотведения путем исследования качества вод на фоновом и контрольном створах // Водное хозяйство России. 2011. № 2. С. 30—37.
6. Александровская Л.Н., Круглов В.И., Кузнецов А.Г. и др. Теоретические основы испытаний и экспериментальная обработка сложных технических систем. М.: Логос, 2003. 736 с.

7. Никаноров А.М. Научные основы мониторинга качества вод. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 576 с.
8. ГОСТ Р ИСО 5725—2—2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений. М.: Изд-во стандартов, 2002. 42 с.
9. РД 52.24.622—2001. Методические указания. Проведение расчетов фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков. Утв. Росгидрометом 01.01.2001. Введ. 01.01.2002.
10. ГОСТ Р ИСО 5725—1—2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения. М.: Стандартиформ, 2006. 23 с.
11. *David Walker*. Accuracy and precision in sampling water. ISO Focus. 2006. № 6. P. 21—24.

Сведения об авторах:

Розенталь Олег Моисеевич, д. т. н., профессор, главный научный сотрудник, Институт водных проблем Российской академии наук, Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 3, e-mail: mos@mirq.ru

Михеева Светлана Викторовна, к. э. н., доцент, руководитель, Уральское межрегиональное территориальное управление Росстандарта, Россия, 620041, г. Екатеринбург, ул. Красноармейская, 2А, e-mail: kachestvo@uraltest.ru