

УДК 628.394(001.57)

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА БИОГЕННОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ МАЛЫХ РЕК (НА ПРИМЕРЕ НЕЧЕРНОЗЕМНОЙ ЗОНЫ РФ) SIMULATION OF STOCHASTIC PROCESS OF NUTRIENT POLLUTION IN SMALL RIVERS (IN EXAMPLE OF NECHERNOZEM ZONE OF THE RUSSIAN FEDERATION)

С.Н. Коваленко, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, тел.: (812) 535-46-10, e-mail: kovalenko03@mail.ru
S. N. Kovalenko, Saint-Petersburg State Polytechnical University, 195251, Russian Federation, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29, tel.: (812) 535-46-10, e-mail: kovalenko03@mail.ru

Загрязнения поверхностных водотоков биогенными веществами рассматривается как вероятностный процесс. При недостаточности натурной информации предлагается выполнять математическое моделирование методом Монте-Карло. Выделены напряженные периоды при биогенном загрязнении водоприемника стоками с мелиоративных территорий. Предлагается методика назначения допустимых концентраций биогенов в сбросных водах с учетом стохастического характера формирования гидрохимических параметров стока.

Ключевые слова: Нечерноземная зона РФ, малые реки, мелиоративные осушительные системы, дренажный сток, биогены, математическое моделирование методом Монте-Карло, стохастический процесс.

Pollution of surface water by nutrients is considered as probabilistic process. With insufficient life information is invited to perform mathematical simulation by the Monte Carlo method. The intense periods are allocated at biogenic pollution of a water intake by drains from meliorative territories. The technique of the appointment of the allowable nutrients concentration in the waste waters, is offered in view of stochastic character of the formation of hydrochemical parameters of a drains.

Key words: Nechernozem zone of the Russian Federation, small rivers, drainage system, drainage runoff, nutrients, mathematical modeling by the Monte Carlo method, a stochastic process.

На современном этапе исследований при оценке загрязненности поверхностных вод различными веществами доминирует детерминированный подход. Суть его заключается в сопоставлении результатов химического анализа содержания в пробе воды загрязняющих веществ с нормативно установленной концентрацией данного ингредиента в речной воде.

В основу предлагаемого метода расчета допустимого уровня содержания загрязняющего вещества в речной воде положен стохастический анализ исходной информации, результатом которого является получение кривой обеспеченности максимального содержания загрязняющего вещества в створе полного смешения речных и сбросных вод с учетом фонового загрязнения речных вод.

Гидрологические и гидрохимические характеристики малых рек в настоящее время изучены слабо. Данная категория рек относится к третьему и четвертому классу по классификации Росгидромета. Наводных объектах третьей категории наблюдения проводятся один раз в месяц, на объектах четвертой категории — в определенные гидрологические фазы (в среднем 3–7 раз в год).

Данных натурных наблюдений недостаточно для проведения такого полноценного анализа, поэтому метод базируется на использовании способа удлинения рядов наблюдений с помощью математического моделирования. На полученной кривой обеспеченности устанавливается величина вероятности превышения, соответствующая предельно допустимой концентрации (ПДК) конкретного ингредиента. Расчетное значение обеспеченности предлагается назначать с учетом категории реки и ее загрязненности в среднем на 5–10% меньше обеспеченности ПДК. Расчетное значение концентрации загрязняющего вещества в створе полного смешения речных и дренажных вод используется для назначения предельно допустимого содержания загрязняющего вещества в дренажных водах в соответствии с балансовым уравнением.

В процессе анализа натурных наблюдений удалось выделить два напряженных сезона, связанных с особенностями работы дренажных осушительных систем: весенний (март–май) и осенний (август–октябрь). Эти системы являются основными загрязнителями природных вод малых рек биогенными веществами, которые поступают с сельскохозяйственных угодий, расположенных на площади бассейнов рек.

Математическое моделирование концентрации загрязняющего вещества основано на использовании метода Монте-Карло. В основе метода лежит натурная информа-

ция о максимальной концентрации загрязняющих веществ в речных водах и средней арифметической за выбранный сезон наблюдений. Статистический анализ этих данных обнаружил довольно тесную корреляционную связь между ними. Естественно, что за короткий срок наблюдений при весьма малой частоте наблюдений сведения о максимальной концентрации загрязняющих веществ в речном стоке являются недостоверными. Между тем среднее арифметическое в статистическом анализе является наиболее устойчивой вероятностной характеристикой. В этой связи удлинение рядов наблюдений за средней концентрацией загрязняющих веществ в пределах одного сезона в речных водах математическим методом представляется достаточно надежной операцией. При этом должно приниматься во внимание наличие или отсутствие автокорреляционных связей в хронологических рядах наблюдений [7]. При отсутствии таких связей расширение ряда наблюдений реализуется непосредственно по сглаженной кривой обеспеченности, полученной по результатам натурных наблюдений.

При наличии автокорреляционных связей в хронологическом ряду наблюдений за средними величинами концентрации загрязняющих веществ в пределах одного сезона математическое моделирование усложняется и реализуется в соответствии с формулой [7].

$$C_{ci} = [\bar{C}_c + r \cdot (C_{c_{i-1}} - \bar{C}_c)] K_{pi} (\xi_i, CV_i^{ycn}) \quad (1)$$

где на первом шаге моделирования C_{ci} — это первая искомая средняя за сезон случайная концентрация загрязняющего вещества, распределенная по трехпараметрическому гамма-распределению с автокорреляционной связью; \bar{C}_c — среднее арифметическое значение концентрации из средних величин данных натурных наблюдений; r — коэффициент автокорреляции; $C_{c_{i-1}}$ — последнее значение концентрации загрязняющего вещества в хронологическом ряду; K_{pi} — ордината, определенная по кривой обеспеченности в зависимости от выбранного случайного числа и условного коэффициента вариации (CV_i^{ycn}):

$$CV_i^{ycn} = \frac{\sigma \cdot \sqrt{1-r^2}}{\bar{C}_c + r(C_{c_{i-1}} - \bar{C}_c)} \quad (2)$$

где σ — среднее квадратическое отклонение.

Зависимость для моделирования случайных максимальных величин концентрации загрязняющего вещества за лимитирующий сезон имеет вид [7]:

$$C_{m_i} = \bar{C}_m + R \cdot \frac{\sigma_m}{\sigma_c} \cdot (C_{c_i} - \bar{C}_c) + \xi_i \cdot \sigma_m \cdot \sqrt{1-R^2} \quad (3)$$

где ξ_i — случайная нормально-распределенная величина, C_{mi} — максимальное, а C_{ci} — среднее арифметическое значение концентраций конкретного ингредиента за один сезон i -го года ($i = 1, 2, 3, \dots, n$, n — число лет наблюдений), R — коэффициент корреляции, σ_m и σ_c — средние квадратические отклонения C_{mi} и C_{ci} , \bar{C}_m и \bar{C}_c — соответственно среднее арифметическое из максимальных и средних за весь срок наблюдений величин концентрации загрязняющего вещества за сезон.

Таким образом, в предлагаемом методе математическое моделирование реализуется дважды: вначале моделируются средние значения концентрации загрязняющего вещества за весенний или осенний сезоны, а затем с учетом регрессионных связей — максимальное значение в выбранном сезоне.

Для выполнения математического моделирования концентрации биогенов в малых реках выбраны пять водотоков в бассейнах рек Северной Двины и Верхней Волги на территории Вологодской области [9]. В настоящей работе апробация методики осуществляется на натурной информации по реке Верхняя Ерга.

Река Верхняя Ерга является левым притоком реки Сухоны, впадающая в нее в среднем течении. По принятой классификации Верхняя Ерга относится к малым рекам. На ней установлен один гидрометрический пост наблюдений Росгидромета, совмещенный с гидрохимическим. Натурные наблюдения на данном посту относятся к четвертой категории и производятся лишь в определенные гидрологические фазы водного объекта. Экспериментальный ряд наблюдений охватывает период с 1978 г. по 2006 г. В общей сложности ряд хронологических данных натурных наблюдений за концентрацией аммонийного азота составляет 147 значений. Из них за весенний сезон объем выборки составляет 85 значений. Из натурального хронологического ряда наблюдений за весенний сезон были получены средние арифметические значения в каждом году наблюдений и отобраны максимально наблюдаемые величины соответственно для каждого года. Таким образом, сформировано два ряда величин объемом в 28 значений. Выполнена статистическая обработка средних арифметических значений концентрации аммонийного азота для весеннего сезона. Получены следующие статистические характеристики: 1) максимальное значение из средних арифметических в ряду: 1,18 мгN/л; 2) среднее арифметическое значение: 0,47 мгN/л; 3) коэффициент вариации C_v : 0,69; 4) отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации C_s/C_v : 1,05.

Построена эмпирическая кривая обеспеченности, к которой подобрана, с помощью статистического критерия согласия Пирсона, аналитическая кривая трехпараметрического гамма-распределения с параметрами $C_v=0,7$, $C_s/C_v=1$. Расчетное значение критерия Пирсона равно 6,24, а критическое — 10,81.

Эмпирическая кривая включает в себя 28 натуральных значений и 100 величин, полученных математическим моделированием. По совместным данным, полученных в результате натурального эксперимента и смоделированных значений, определены для максимальных концентраций аммонийного азота следующие статистические характеристики: 1) максимальное значение в ряду: 2,31 мгN/л; 2) среднее арифметическое значение: 0,60 мгN/л; 3) коэффициент вариации C_v : 0,81; 4) отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации C_s/C_v : 1,12.

Аналитическая кривая обеспеченности трехпараметрического гамма-распределения имеет следующие параметры: $C_v=0,8$; $C_s/C_v=1$. Методика определения допустимого уровня загрязняющего вещества в устье магистрального канала, впадающего в водоприемник, заключается в нахождении значения соответствующего ПДК и определении его обеспеченности.

В данном случае обеспеченность ПДК составляет примерно 7%. Согласно предлагаемой методике величину обеспеченности необходимо увеличить. Принимаем обеспеченность допустимого уровня загрязнения равной 10%, ей соответствует максимальная концентрация 1,3 мгN/л. Полученная величина считается расчетной с учетом стохастического характера процесса загрязнения. Расчет концентрации загрязняющего вещества в дренажных водах следует проводить по балансовой зависимости, учитывая расчетные характеристики расходов речного и дренажного стока, а также концентрации загрязняющего вещества в фоновом створе. В первом приближении можно рекомендовать следующие расчетные величины обеспеченности: 60% для речного и 40% для дренажного стоков. Обеспеченность концентрации загрязняющего вещества в фоновом створе рекомендуется принимать равной 50% по кривой обеспеченности средних концентраций за сезон.

Список литературы

1. Боглов М.В., Мишон В.М. и др. Современные проблемы оценки водных ресурсов и водообеспечения. — М.: Наука, 2005. — 318 с.
2. Бронштейн И.Н., Семенов К.А. Справочник по математике. — М.: Наука, 1980. — 977 с.
3. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Расчет многолетнего регулирования речного стока с учетом корреляционной связи между стоком смежных лет. «Труды 3 Всесоюзного гидрологического съезда», 1959, т. 6, с. 6—18.
4. Крицкий С.Н., Менкель М.Ф. Гидрологические основы управления речным стоком. — М.: Наука, 1981. — 255 с.
5. Максимов Ю.Д. Математическая статистика. — СПб.: СПбГПУ, 2004. — 100 с.
6. Михалев М.А. Инженерная гидрология. — СПб: СПбГПУ, 2003. — 360 с.
7. Резниковский А.Ш., Александров А.Ю. и др. Гидрологические основы гидротехники. — М.: Энергия, 1979. — 232 с.
8. Ряпушкин Т.В., Ефимова М.Р. и др. Общая теория статистики. — М.: Финансы и статистика, 1981. — 279 с.
9. Федеральная служба России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Северное территориальное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Государственный водный кадастр. Раздел 1.: Поверхностные воды. Серия 2.: Ежегодные данные о качестве поверхностных вод. Часть 1: Реки и каналы. Том. 1 (28). РФ (Бассейны рек на территории Архангельской, Вологодской и Республики Коми).