Препринт

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПРОГНОЗ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В РЕЧНЫХ СИСТЕМАХ

Долгоносов Б.М., Корчагин К.А., Мессинева Е.М.

Институт водных проблем РАН, Москва, e-mail: borismd@aqua.laser.ru

ВВЕДЕНИЕ

Возникновение экстремальных загрязнений водной среды обусловлено действием множества факторов, в том числе случайных, придающих изменчивости показателей качества воды стохастический характер. Особую опасность представляют значения показателей, значительно выходящие за пределы, предписанные существующими системами нормативов (рыбохозяйственными или для источников водоснабжения). Причинами таких экстремальных выбросов могут быть природные явления: снеготаяние, дожди, цветение фитопланктона и др., а также антропогенное загрязнение, вносимое сточными водами, атмосферными осадками, поверхностным и подземным стоком и т.д. Интегральное представление обо всей совокупности воздействий на водосборе дают временные ряды показателей качества воды в створах, важных для водопользователей. Проблема состоит в том, чтобы извлечь заключенную в этих рядах информацию о процессах переноса и трансформации загрязнений. Для этой цели необходимо привлечение теоретических представлений о том, как эти процессы развиваются, какие факторы являются определяющими, какова вероятность возникновения экстремальных выбросов различной амплитуды для разных показателей качества воды. Эта программа исследований последовательно развивается, охватывая такие показатели, как мутность, цветность, перманганатная окисляемость, щелочность, pH, аммиак, хлориды, железо, алюминий, фитопланктон, группа микробиологических показателей, включая общие и термотолерантные колиформы, сульфитредуцирующие клостридии, общее микробное число, колифаги, фекальные стрептококки. Во всех случаях рассматривается макродинамика показателей, основанная на теоретических представлениях о механизмах процессов. Учитывается действие случайных факторов, которые переводят детерминистическое описание в стохастическое. Затем производится переход от стохастического описания к статистическому путем введения статистического ансамбля и плотности распределения, эволюционирующей в соответствии с уравнением Фоккера–Планка–Колмогорова. В результате находится функция распределения, которая позволяет для каждого показателя определять вероятность превышения заданного порога. Задавая высокие пороги, можно найти вероятности экстремальных выбросов показателей, опасных для состояния водной экосистемы или для системы водоснабже-

ния. В докладе дается краткий обзор результатов, полученных за последние годы в указанном направлении исследований. Проверка теоретических соотношений проводится для показателей качества воды р. Москвы в створе водозабора Западной станции водоподготовки (для анализа используются данные лаборатории станции).

ВЕРОЯТНОСТИ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

Мутность

Экстремальные выбросы мутности скоррелированы с высокими расходами воды в реке в периоды снеготаяния и при интенсивных дождях (рис. 1). Показано [1, 2], что вероятности экстремальных выбросов (вероятности превышения, или обеспеченности) подчиняются распределению Парето

$$P(x) \sim x^{-\alpha} \qquad (1)$$

где x – расход или мутность, с показателем степени α = 1.5–1.6 для расхода воды и α = 1.8–1.9 для мутности. Для расхода воды и мутности значения α попадают в интервал $1 < \alpha < 2$, поэтому соответствующие распределения имеют конечное математическое ожидание, но бесконечную дисперсию. Временные ряды этих показателей демонстрируют катастрофические выбросы.

Показатели органического вещества

Используются косвенные показатели содержания органического вещества: цветность и перманганатная окисляемость (рис. 2). Обработка данных показывает, что действует тот же закон Парето (1) с показателем α = 4.0 для цветности и α = 5.8 для окисляемости. Цветность имеет моменты до четвертого, а окисляемость – до пятого порядка включительно. Поведение этих показателей не носит катастрофического характера: их наблюдаемые максимумы всего в 3–5 раз превышают средние значения (тогда как для расхода наблюдаются 36-кратные превышения, а для мутности – 17-кратные). При отсутствии катастрофичности остается лишь общий признак степенных законов распределения – отсутствие характерных масштабов процессов в области высоких значений величин.

Показатели солевого состава

Из этой группы показателей изучались следующие: pH, щелочность, хлориды, аммоний, железо, алюминий. Показано [3], что концентрации ингредиентов распределены по логнормальному закону, в соответствии с которым вероятности превышения задаются выражением

$$P(x) = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha \ln x + \beta}{\sqrt{2}}\right), \quad (2)$$

где erfc – дополнительная функция ошибок, x – концентрация ингредиента. В случае pH в этой формуле вместо $\ln x$ надо подставить pH, так как этот показатель уже есть (отрицательный) логарифм концентрации водородных ионов. Таким образом, для pH действует нормальное распределение, приводящее к вероятности превышения

$$P(x) = \frac{1}{2}\operatorname{erfc}\left(\frac{\alpha x + \beta}{\sqrt{2}}\right), \quad (3)$$

где x = pH. Обработка данных для указанных показателей приводит к значениям параметров распределений, представленным в табл. 1.

Таблица 1. Параметры распределений показателей солевого состава воды (для pH – формула (3), для остальных показателей – формула (2))

Показатель x	Единица измерения	Параметры распределения
pH	ед. pH	α = 5.76, β = –46.2 при x < 8.1; α = 2.75, β = –21.7 при x > 8.1
Щелочность	мг-экв/л	α = 3.13, β = –4.90 при x < 3.2; α = 10.1, β = –12.9 при x > 3.2
Хлориды	мг/л	α = 2.76, β = –8.33 при x < 12.2; α = 6.14, β = –16.8 при x > 12.2
Аммонийный азот	мг/л	α = 1.32, β = 2.94
Железо общее	мг/л	α = 1.50, β = 2.88
Алюминий общий	мг/л	α = 1.27, β = 4.10

Полученные распределения позволяют оценивать вероятности превышения установленных нормативов. Для источников водоснабжения допускается изменение pH в интервале 6–9. Вероятность превышения верхней границы интервала $P\{pH > 9\} = 1.47\times10^{-3}$. Вероятность можно интерпретировать как отношение времени превышения порога к всему времени наблюдения. Если в качестве времени наблюдения взять один год, то найденная вероятность означает, что указанный порог будет нарушаться в среднем в течение $1.47\times10^{-3}\times365 = 0.54$ сут, что не представляет опасности с точки зрения использования водного объекта в качестве источника водоснабжения. Вероятность выхода за нижнюю границу ничтожно мала.

Для аммонийного азота установлено ограничение < 2.0 мг/л. Аналогичные расчеты показывают, что вероятность превышения этого порога совершенно незначительна 0.58×10^{-4}, что дает время превышения 0.02 сут в году.

Для железа норматив < 0.3 мг/л. Вероятность его превышения составляет 0.14, что соответствует 0.14×365 = 51 сут в году. Это серьезное нарушение норматива, которое заставляет искать причины явления и разрабатывать мероприятия по устранению источников повышенного поступления железа. Следует отметить, что в ряде случаев допускается повышенный норматив по железу < 1.0 мг/л, который вводится постановлением главного санитарного врача территории в зависимости от санитарно-эпидемиологической обстановки в населенном пункте и применяемой технологии водоподготовки. Вероятность превышения этого более высокого порога составляет 1.97×10^{-3}, или 0.72 сут в году, что уже менее значимо, чем при более жестком нормативе.

Для алюминия действует ограничение < 0.5 мг/л. Вероятность превышения составляет 0.65×10^{-3}. Норматив будет нарушаться в среднем в течение 0.24 сут в году, что не представляет угрозы для системы водоснабжения.

В отношении хлоридов ограничение столь велико (< 350 мг/л), что его превышение в рассматриваемом водном объекте практически невозможно.

Щелочность воды в настоящее время не нормируется. Тем не менее, ее величина важна для коагуляционной обработки воды на станциях водоподготовки. Коагуляция требует определенного щелочного резерва природной воды, который необходим для образования крупных флокул, способных к эффективному осаждению в отстойниках. Природная щелочность воды большинства рек достаточна для обеспечения коагуляции даже высокими дозами сульфата алюминия. Однако поступление в реку болотных вод снижает щелочность. Она снижается также при снеготаянии, так как талые воды содержат мало карбонатов и гидрокарбонатов.

Поскольку формирование того или иного показателя – случайный процесс, существует вероятность того, что установленный нормативный предел будет нарушен в течение какого-то времени. В связи с этим надо нормировать не только предельное значение показателя, но и вероятность его превышения (обеспеченность) q. Продемонстрируем, как это должно осуществляться, на примере железа в том случае, когда действует нормативный предел 1 мг/л. Положим, что по санитарным (или экологическим) соображениям установлена допустимая суммарная длительность превышения этого предела, например в течение 5 сут за 10 лет наблюдения, т.е. фактически задана обеспеченность данного нормативного предела $q = 5/(10\times365) = 1.4\times10^{-3}$. Расчеты показали, что превышение предела в 1 мг/л для данного водного объекта происходит с более высокой вероятностью 1.97×10^{-3}, что дает суммарную длительность нарушения норматива 7.2 сут за 10 лет, превышающую установленные 5 сут. Отсюда должен следовать вывод о том, что для снижения длительности превышения норма-

тивного предела необходимо провести мероприятия по уменьшению поступления железа в водный объект.

В настоящее время обеспеченность (вероятность превышения) допустимых пределов для показателей качества воды не нормируется, однако логика поведения случайных величин убедительно показывает, что это необходимо делать, так как никакой установленный предел не может соблюдаться со 100%-ной вероятностью.

Микробиологические показатели

Изучались следующие показатели из этой группы: общие и термотолерантные колиформные бактерии, сульфитредуцирующие клостридии, общее микробное число, колифаги, фекальные стрептококки [4]. Изменение численности колиформ в течение ряда лет показано на рис. 3. Теоретически показано, что численности микроорганизмов распределены по логнормальному закону, для которого вероятности превышения рассчитываются по формуле (2). Обработка временных рядов показателей дает значения параметров распределений, представленные в табл. 2.

Таблица 2. Параметры распределений микробиологических показателей

Показатель x	Единица измерения	Параметры распределения
Колиформы	КОЕ/100 мл	$\alpha = 0.57$, $\beta = -3.79$ при $x < 800$; $\alpha = 1.44$, $\beta = -9.59$ при $x > 800$
Сульфитредуцирующие клостридии	КОЕ/20 мл	$\alpha = 0.26$, $\beta = -2.52$ при $x < 10$; $\alpha = 1.66$, $\beta = -5.75$ при $x > 10$
Общее микробное число	КОЕ/мл	$\alpha = 2.23$, $\beta = -10.3$ при $x < 160$; $\alpha = 0.90$, $\beta = -3.53$ при $x > 160$
Колифаги	БОЕ/100 мл	$\alpha = 0.29$, $\beta = -1.61$ при $x < 10$; $\alpha = 0.92$, $\beta = -3.18$ при $x > 10$
Фекальные стрептококки	КОЕ/100 мл	$\alpha = 0.44$, $\beta = -1.95$ при $x < 300$; $\alpha = 1.19$, $\beta = -6.10$ при $x > 300$

Рассмотрим вероятность превышения нормативных порогов и рассчитаем среднее число дней в году, когда эти нормативы нарушаются. Приведенные ниже результаты надо рассматривать как среднемноголетние.

Для общих колиформ расчеты показывают, что вероятность превышения нормативного порога $x = 1000$ единиц равна $q = 0.36$, а общая продолжительность такого превышения составит $T = 128$ сут в году.

Для термотолерантных колиформ установлен более жесткий нормативный порог $x = 100$ единиц. По расчетам, указанный нормативный порог может быть превышен с вероятно-

стью $q = 0.87$. Следовательно, период сверхнормативного загрязнения воды по этому показателю составит в среднем $T = 318$ сут в году.

Для колифагов превышение нормативного порога $x = 10$ единиц происходит с вероятностью $q = 0.86$, следовательно, средняя продолжительность сверхнормативного загрязнения составит $T = 314$ сут в году.

Для задач проектирования прогноз высоких уровней загрязнения удобно проводить с использованием квантилей q. Если взять $q = 0.001$, то в расчете на год этому значению соответствует длительность сверхпорогового загрязнения 0.365 сут, т.е. около 9 ч. В течение времени высокой нагрузки должны применяться специальные методы очистки. Это обстоятельство необходимо учитывать при проектировании технологической схемы и эксплуатации очистных сооружений.

Фитопланктон

Теоретический анализ развития фитопланктона показывает, что функция распределения его численности описывается в зимний период логнормальным законом, в период вегетации – логарифмическим, а для экстремальных всплесков – нормальным [5]. Обработка данных по численности фитопланктона (ежедневные измерения, рис. 4), подтверждает эти закономерности и позволяет найти параметры распределений (табл. 3).

Таблица 3. Статистические распределения численности фитопланктона x (кл/мл) в разные периоды года; $F(x)$ – функция распределения

Период	Тип распределения	Параметры	
		α	β
Зимний $x < 1000$	Логнормальный $F(x) = \Phi(\alpha \ln x - \beta)$	0.999	7.26
Вегетационный $3000 < x < 60000$	Логарифмический $F(x) = \alpha \ln x - \beta$	0.188	1.05
Высокие всплески численности $x > 60000$	Нормальный $F(x) = \Phi(\alpha x + \beta)$	1.05×10^{-5}	1.45

Полученные результаты позволяют оценивать вероятности различных численностей фитопланктона практически во всем интервале значений. Особый интерес представляют высокие значения: они наиболее опасны для технологических систем водоподготовки и для благополучия водных экосистем. Вероятность превышения этих значений находится по со-

отношению $P(x) = 1 - F(x)$. Несколько рассчитанных значений для изучаемого створа р. Москвы приведены в табл. 4.

Таблица 4. Вероятности превышения заданных уровней численности фитопланктона

Численность клеток x, тыс. кл/мл	Вероятность превышения $P(x)$	Число суток превышения за 10 лет
100	6.24×10^{-3}	22.8
150	1.26×10^{-3}	4.59
200	1.96×10^{-4}	0.72

Интерпретацию полученных результатов покажем на следующем примере. В силу ряда причин можно сформулировать ограничения на численность фитопланктона, которые связаны с технологическими (например, забиваются фильтры), санитарными (выделяются метаболиты и токсины, ухудшаются показатели качества воды) или экологическими (ухудшается кислородный режим, возникают заморы и т. п.) соображениями. По этим причинам должно быть введено ограничение на численность фитопланктона. Допустим, считается опасным превышение уровня x = 100 тыс. кл/мл. Указанное значение попадает в интервал, соответствующий третьей строке табл. 3. По приведенной в этой строке формуле и значениям параметров рассчитывается вероятность превышения $P(x)$ (табл. 4). Должны существовать нормативы, которые устанавливают срок наблюдения и допустимую продолжительность превышения опасного уровня в течение этого срока (заметим, что в настоящее время такой нормативной базы нет). Пусть установлен срок наблюдения в 10 лет, а также предел продолжительности превышения опасной численности за это время, равный 15 сут. По найденной вероятности превышения рассчитываем число суток превышения по формуле $P(x) \times 365 \times 10$. Получается ~23 сут, что превышает установленный предел в 15 сут. Следовательно, должны быть проведены мероприятия по снижению антропогенной нагрузки на водный объект.

ВЫВОДЫ

Проведенный теоретический анализ позволяет указать типы распределений различных показателей качества воды в характерные периоды года, оценить параметры распределений, дать вероятностный прогноз появления высоких значений показателей и обосновать мероприятия по улучшению экологического состояния водного объекта. Показано, что для ряда показателей (мутность, цветность, перманганатная окисляемость), которые формируются в стационарном режиме, вероятности превышения порога зависят от величины этого порога по степенному закону (в этом случае говорят о «тяжелых» хвостах распределений). Для других показателей (группа микробиологических показателей, щелочность, pH, аммиак, хло-

риды, железо, алюминий) функции распределения подчиняются логнормальному закону (т.н. «полутяжелые» хвосты распределений). Иной результат получен для фитопланктона; для него характерна комбинированная функция распределения, которая в области малых численностей подчиняется логнормальному закону, в области промежуточных численностей – логарифмическому, а в области высоких – нормальному. Все найденные теоретическим путем функции распределения сопоставляются с эмпирическими функциями распределения, полученными непосредственно из анализа временных рядов показателей качества воды для Москворецкого источника водоснабжения. Наблюдается хорошее согласие между теоретическими и эмпирическими кривыми распределений. Найдены значения параметров распределений, которые позволили использовать полученные распределения для вероятностного прогнозирования рассмотренных показателей качества воды, т.е. нахождения для них вероятностей экстремальных выбросов. Обоснована необходимость введения обеспеченности (вероятности превышения) в практику нормирования показателей качества воды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгоносов Б.М., Корчагин К.А. Статистическая оценка взаимосвязи расхода воды в реке и ее мутности в водозаборных сооружениях // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 2. С. 196-204.

2. Долгоносов Б.М., Корчагин К.А. Вероятностные закономерности неблагоприятных гидрохимических явлений // Водные ресурсы. 2005. Т. 32. № 4. С. 452-458.

3. Долгоносов Б.М., Корчагин К.А. Моделирование изменчивости показателей солевого состава речной воды // Водные ресурсы. 2011. Т. 38 (в печати).

4. Долгоносов Б.М., Корчагин К.А., Мессинева Е.М. Модель флуктуаций бактериологических показателей качества речной воды // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 6. С. 686-700.

5. Долгоносов Б.М., Корчагин К.А., Мессинева Е.М. Статистические распределения численности фитопланктона в речной воде // Водные ресурсы. 2010. Т. 37. № 2. С. 218–224.