

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В РЕЧНОЙ СИСТЕМЕ В ПЕРИОДЫ СНЕГОТАЯНИЯ

© 2013 г. Б.М. Долгоносов, К.А. Корчагин

Институт водных проблем Российской академии наук, Москва

Ключевые слова: показатели качества воды, экстремальные явления, снеготаяние, р. Москва.



Б.М. Долгоносов



К.А. Корчагин

Исследовано развитие экстремальных гидрохимических явлений в периоды снеготаяния в р. Москве (Рублево) в их взаимосвязи с расходом воды в реке. В основе анализа лежат ряды среднесуточных значений основных показателей качества воды, включая мутность, цветность, перманганатную окисля-

емость, щелочность, рН, хлориды, ион аммония, железо, электропроводность, а также данные по расходу речной воды. Из рядов данных за 15 лет наблюдений (1997–2011 гг.) выделен двухмесячный расчетный период 15 марта – 15 мая, который охватывает пик половодья, предшествующие ему волны оттепелей и последующий период релаксации. Описаны особенности экстремального поведения показателей в указанный период. Изменчивость показателей в период снеготаяния проиллюстрирована данными за 1998 и 1999 гг., когда проводилась промывка русла реки. Во время этих мероприятий наиболее отчетливо проявились связи между показателями качества и расходом воды. Определен суммарный сток ингредиентов за половодье в зависимости от стока воды. Показано, что эта зависимость подчиняется линейному закону.

В периоды снеготаяния в речных системах происходит значительное ухудшение качества воды по многим показателям. Накопленные на водосборе за зимний период вещества поступают в реку, создавая критические условия для водной экосистемы и питьевого водоснабжения. В связи с этим были проведены исследования экстремальных гидрохимических явлений в

Водное хозяйство России № 4, 2013

Водное хозяйство России

периоды снеготаяния по данным о качестве воды в р. Москве (Рублево) на участке отбора воды для водоснабжения. Было изучено поведение основных показателей качества воды: мутность (М), цветность (Цв), перманганатная окисляемость (ПО), щелочность (Щ), рН, хлориды, ион аммония, железо общее, электропроводность и их зависимость от изменения расхода.

В качестве материала для анализа рассмотрены ряды среднесуточных значений гидрохимических показателей и расхода воды, полученные путем обработки данных технологического контроля качества исходной воды на станции водоподготовки и измерений расхода воды через плотину Рублевского гидроузла [1, 2]. Из рядов данных выделен двухмесячный расчетный период 15 марта – 15 мая каждого года в течение 15 лет наблюдений (1997–2011 гг.). Каждый двухмесячный интервал охватывает предшествующие половодью волны оттепелей, пик половодья и следующий за ним период релаксации.

Динамика показателей качества воды во время выделенного двухмесячного интервала иллюстрируется на примере 1998 и 1999 гг., когда проводили промывку русла реки [3, 4]. Во время этих мероприятий наиболее отчетливо проявились связи между показателями качества и расходом воды, тогда как в годы со слабо выраженными половодьями эти связи менее заметны.

Изменчивость расхода воды и показателей качества

Расход воды. Динамика речного стока во многом определяет изменчивость показателей качества воды. Поэтому необходимо выявить особенности поведения расхода воды в периоды снеготаяния. Основное внимание уделим пиковым значениям расхода.

Регулярные пики половодья разной интенсивности попадают обычно на апрель и, за редким исключением, являются годовыми максимумами расхода воды. Часто до главного пика половодья в периоды оттепелей появляются предвестники в виде небольших повышений расхода (Q), как это наблюдалось, в частности, в 1998 и 1999 гг. В 1998 г. максимальный среднесуточный расход воды пришелся на 24 апреля и составил $672 \text{ м}^3/\text{с}$, а в 1999 г. на 14 апреля $748 \text{ м}^3/\text{с}$. Часовые расходы были существенно выше. Для сравнения в 1998 г. максимальный часовой расход составил $780 \text{ м}^3/\text{с}$ [3]. В 2009 г. максимальный суточный расход $591 \text{ м}^3/\text{с}$ (16 мая) находится уже за пределами половодья и связан с попусками воды из водохранилищ. Сам пик половодья наблюдался 9 апреля 2009 г. при расходе воды $125 \text{ м}^3/\text{с}$.

В другие годы максимумы расхода воды в половодье не превышали $300 \text{ м}^3/\text{с}$. Оттепели, предшествующие основному пику половодья, понижают его высоту. Самые низкие пики половодья (меньше $100 \text{ м}^3/\text{с}$) за 15-летний период наблюдений отмечены в 1997, 2002, 2007, 2008 и 2011 гг. и име-

ли максимальный расход соответственно 80,2; 60,6; 88,0; 73,0 и 89,2 м³/с. Меженные расходы обычно находятся в интервале 10–20 м³/с.

Мутность. Годовые максимумы мутности, как правило, попадают на половодья. Высокие значения мутности в этот период вызваны накоплением в снеге органических и минеральных частиц, смывом продуктов выветривания с поверхности водосбора и эрозией иловых отложений. Наиболее высокая среднесуточная мутность 73,2 и 62,7 мг/л (по каолину) наблюдалась в половодья 1998 и 1999 гг. (рисунок); при этом максимальная часовая мутность составляла 100 и 99 мг/л соответственно.

Следующие по рангу максимумы мутности величиной 56,5; 43,6; 41,8 и 34,4 мг/л наблюдались соответственно в половодья 2004, 2005, 2001 и 2003 гг. В остальные годы максимумы среднесуточных значений мутности в половодье не превышали 30 мг/л. Меженные значения мутности обычно находятся на уровне 1,5–3,0 мг/л, иногда поднимаясь до величины порядка 10 мг/л во время дождей или зимних оттепелей.

Органическое вещество. Измеряли косвенные показатели органического вещества: цветность и перманганатную окисляемость. В период половодья пик ПО нарастает, несколько опережая пик расхода: опережение составляет двое суток. Затем, несмотря на нарастание расхода, ПО снижается, т. к. истощается запас органического вещества на водосборе (тот же эффект, что и для мутности). Однако на склоне пика расхода наблюдается повторное повышение ПО, хотя и менее значительное, чем на фронте половодья. Вероятно, этот эффект связан с запаздыванием в добегании почвенных вод, насыщенных гумусовыми веществами, в т. ч. окрашенными. Именно по этой причине повышение цветности на спаде половодья значительнее, чем на его фронте (в отличие от ПО).

Коэффициент цветности, определяемый как отношение показателей Цв и ПО, варьирует в течение года. По данным [5], коэффициент цветности для воды р. Днепра в период половодья изменялся в пределах 6–9 град/(мгО₂/л). Это значит, что 1 град цветности соответствовал ПО = 0,11–0,17 мгО₂/л. По многолетним данным, для р. Москва в период половодья коэффициент цветности находится в пределах 4–8 град/(мгО₂/л), соответственно на 1 град цветности приходится 0,12–0,24 мгО₂/л. Далее в расчетах будем использовать среднюю оценку 1 град = 0,18 мгО₂/л.

Как правило, пики цветности наблюдаются на спаде половодья, однако они далеко не всегда являются годовыми максимумами. Часто более высокая цветность бывает при выпадении дождей: дождевые воды смывают почвенный гумус, а также выносят высокоцветную болотную воду. В годы с малым количеством дождей наблюдается понижающий тренд цветности от одного половодья до следующего. Наиболее яркие примеры: период с конца апреля 1999 г. до начала апреля 2000 г. или период с конца апреля 2005 г. до

начала марта 2006 г. Причина состоит в том, что к началу половодья имеется накопленный с прошлого года запас гумуса, который вымывается тальными водами. В течение летне-осеннего периода запас гумуса постепенно пополняется и частично вымывается дождевым стоком. Наиболее интенсивное накопление мертвой органики происходит в процессе осеннего опада, однако гумус созревает и вовлекается в оборот с наибольшим эффектом только к началу следующего половодья. Аналогичное явление имеет место и для ПО, хотя в этом случае наблюдаются более сильные флуктуации, обусловленные смывом дождевыми водами накопленного на водосборе органического вещества негумусового происхождения (а также неорганических соединений, окисляемых перманганатом).

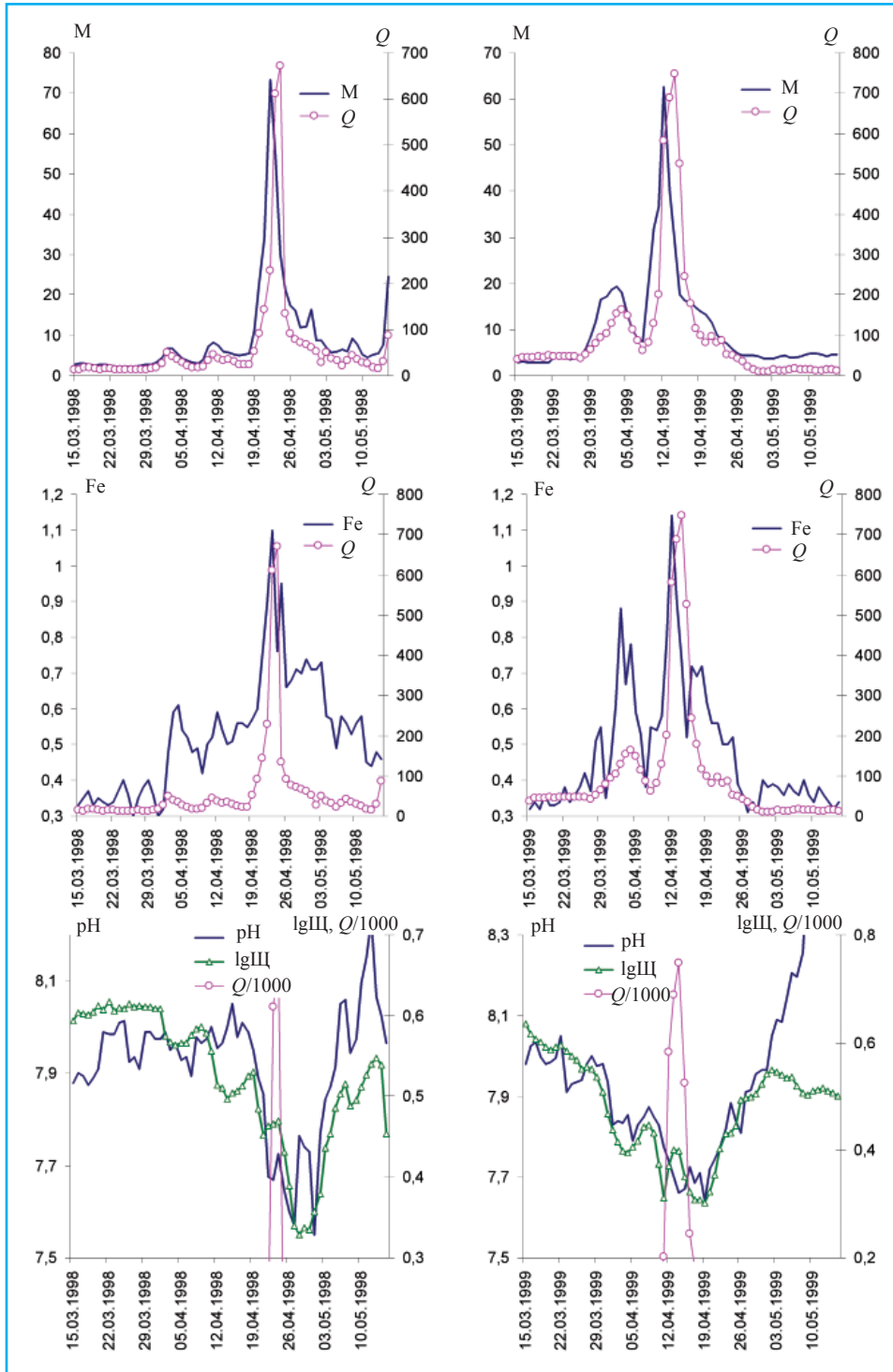
Железо. Низкий уровень железа общего (Fe) наблюдается со второй половины 2001 г. В 2002 г. это явление, по-видимому, обусловлено аномально теплой зимой с несколькими волнами оттепелей и слабо выраженным половодьем. В 2003 г. половодье было несколько выше, чему соответствует небольшой пик железа, однако фоновый уровень этого компонента оставался по-прежнему низким в течение всего года вплоть до следующего половодья. Перед началом этого почти трехлетнего периода и после его окончания содержание железа фиксировалось на более высоком уровне. Как видно из дальнейшего анализа, отмеченное временное понижение фона железа вносит искажения в закономерности динамики этого компонента, хотя не исключено, что такое явление может повторяться в будущем (например, во время теплых зим).

В период 1997–2000 гг. наблюдался повышенный фон Fe в воде с пиками во время половодий. Затем в течение почти трех лет – со второй половины 2001 г. до половодья 2004 г. – держался низкий фон железа на пределе обнаружения методики (0,05 мг/л). В последующие годы уровень железа вновь повысился вплоть до конца 2010 г. В меженные периоды концентрация железа в воде держалась на уровне 0,1–0,2 мг/л за исключением 1997 и 1998 гг. с довольно сильными флуктуациями концентрации.

Высота пиков железа в половодья разных лет сильно варьирует. Наиболее высокий за все время наблюдения пик 1,42 мг/л отмечен в 2000 г. Следующие по рангу пики 1,26 и 1,14 мг/л выпадали на половодья соответственно 2005 и 1999 гг. Остальные пики – ниже 1 мг/л.

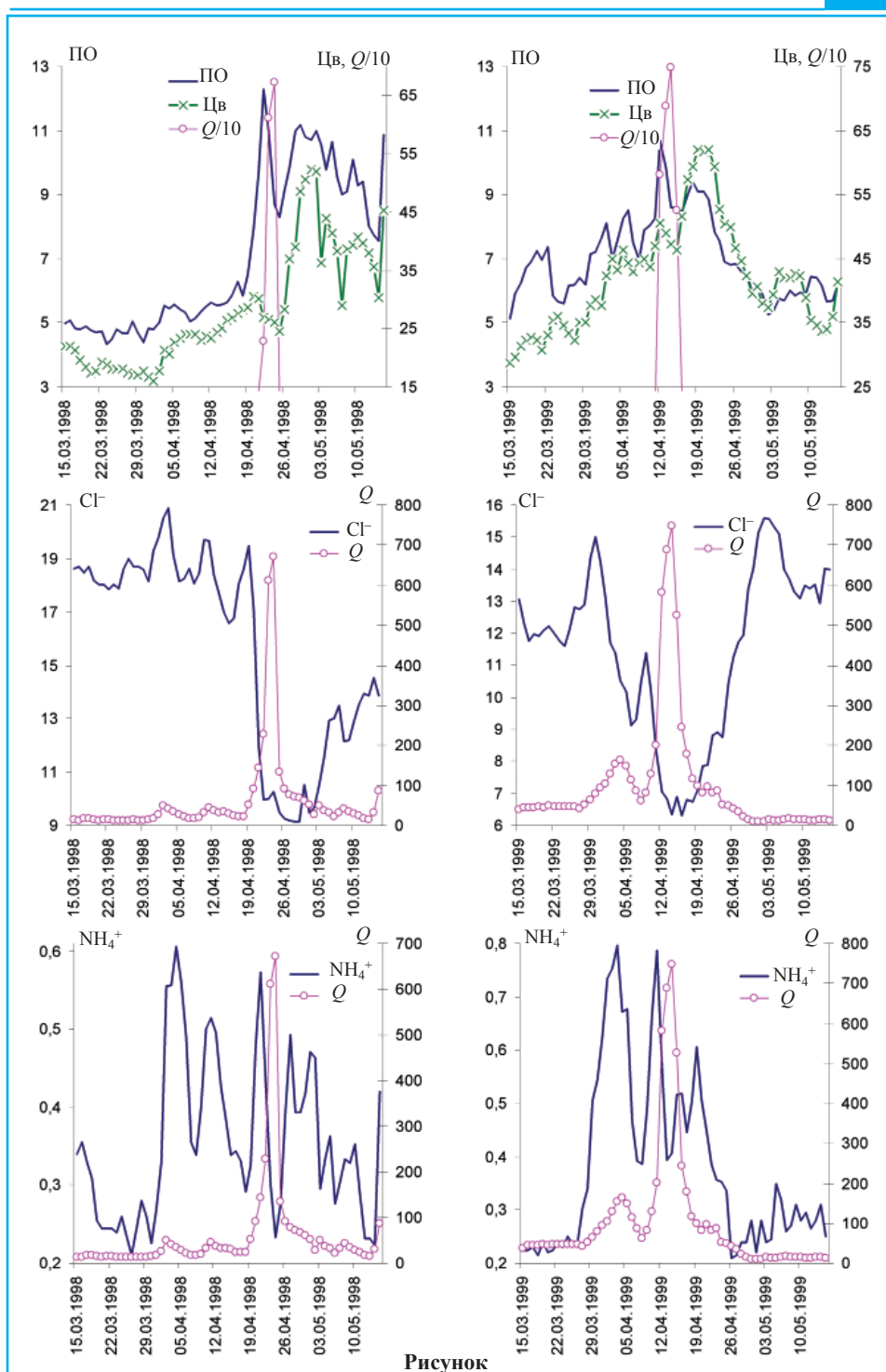
В период снеготаяния повышение концентрации железа наблюдается во время оттепелей (см. рисунок). Так, в 1998 г. перед основным пиком половодья видны две волны повышения уровня железа, ассоциированные с двумя волнами роста расхода воды. В 1999 г. основному пику половодья предшествовал один достаточно высокий пик железа вместе с соответствующим повышением расхода.

Существенный вклад в концентрацию железа в речной воде вносят соединения Fe, присутствующие на поверхности водосбора в составе подстил-



Водное хозяйство России № 4, 2013

Водное хозяйство России



ки из растительного опада, а также в болотных и грунтовых водах. Судя по уровню Fe в меженные периоды (0,1–0,2 мг/л), когда преобладает грунтовое питание реки, его содержание в грунтовых водах заметно меньше, чем в болотных и почвенных. В половодье рост концентрации железа несколько опережает рост расхода воды в реке. В 1998 г. опережение составило 1 сут, а в 1999 г. – 2 сут. Вторичное повышение концентрации Fe на спаде половодья связано с более поздним добеганием почвенных вод.

Хлориды. За весь период наблюдения хлориды изменялись в интервале 6,3–28,0 мг/л, нижняя граница которого была зафиксирована в апреле 1999 г., верхняя – апреле 2011 г. Относительно высокий уровень хлоридов в зимний период (15–20 мг/л) обусловлен разгрузкой минерализованных подземных вод (см. рисунок). С началом половодья концентрация хлоридов резко снижается до 6–9 мг/л за счет разбавления слабоминерализованными талыми водами. В 1999 г. такое же явление наблюдалось во время пика расхода воды, предшествующего основному пику половодья: нарастание расхода сопровождалось падением концентрации хлоридов и, наоборот, снижение расхода приводило к росту концентрации. В 1998 г. предвестники половодья на кривой расхода слабо выражены, поэтому эффект разбавления не удалось выделить на фоне флуктуаций.

После прохождения половодья восстанавливается более высокая концентрация хлоридов, характерная для меженных периодов, на протяжении которых существенный вклад в речной сток вносят подземные воды.

Щелочность и рН. Щелочность общая (Щ) позволяет оценить буферную емкость воды. В процессе снеготаяния наблюдается снижение щелочности (см. рисунок). Она достигает минимальных значений в конце снеготаяния под влиянием накопленных в снеге кислотных примесей (в основном это окислы азота, серы и фосфора), захваченных в атмосфере при формировании снеговых осадков. В период снеготаяния волны роста и падения щелочности соответствуют волнам оттепели и похолодания. После окончания снеготаяния щелочность снова восстанавливается на более высоком уровне. Среднегодовалый скачок щелочности вниз на фронте половодья составляет $1,91 \pm 0,39$ мг-экв/л (среднее \pm стандартное отклонение), а обратный скачок вверх на спаде половодья $1,42 \pm 0,45$ мг-экв/л. Средняя продолжительность всего скачка вниз–вверх $35,4 \pm 7,3$ сут.

Максимальный скачок вниз наблюдался в половодье 1999 г. и составил 2,52 мг-экв/л. Перед началом скачка 13 марта было $Щ = 4,52$ мг-экв/л, нижняя точка 2,00 мг-экв/л достигнута 19 апреля, а обратный скачок вверх на уровень 3,47 мг-экв/л завершен 1 мая. Полная продолжительность скачка вниз–вверх составила 49 сут.

Максимальный скачок вверх (с нижнего положения) произошел в половодье 2003 г. и составил 2,21 мг-экв/л. Весь переход продолжительностью 32 сут выглядел следующим образом: 30 марта – 3,84; 13 апреля – 1,64; 1 мая – 3,85 мг-экв/л.

В период летней межени щелочность колеблется вблизи 3 мг-экв/л, причем минимумы достигаются при выпадении дождей, обычно несущих кислотные примеси. Максимумы наблюдаются в промежутках между дождями, когда преобладают почвенные воды, содержащие карбонаты, гидрокарбонаты, гумусовые вещества, которые увеличивают буферную емкость воды. В зимний период щелочность нарастает, достигая наибольших значений 4,0–4,5 мг-экв/л перед началом снеготаяния.

Как показывают графики на рисунке, изменение рН в значительной мере подобно изменению логарифма Щ: повышенное содержание гидроксил-иона и слабых кислот дает более высокую щелочность и одновременно пониженную концентрацию водородных ионов, а значит, более высокое значение рН. Обратный процесс наблюдается при таянии накопившего кислотные примеси снега, что приводит к понижению Щ и рН. Поэтому, как и для щелочности, наиболее низкие значения рН достигаются на спаде половодья.

Аммоний-ион. Следует отметить пониженный фон аммония в последние годы. Причины наблюдаемых изменений две: во-первых, с 2004 г. в лаборатории станции водоподготовки, контролирующей качество воды, была введена новая методика измерения содержания аммоний-иона, которая дает систематический сдвиг по сравнению со старой методикой; во-вторых, происходит общее снижение выноса аммония с водосбора за счет сокращения использования азотных удобрений. В связи с этим весь ряд разбит на две характерные части: 1997–2003 и 2004–2011 гг.

В периоды зимних оттепелей наблюдается рост концентрации NH_4^+ в речной воде за счет смыва азотных удобрений, органических отходов и фекальных загрязнений с территории водосбора (см. рисунок). Основной пик аммония несколько опережает (на 3 сут) пик расхода воды в реке во время половодья: наибольшие концентрации достигаются на фронте половодья. Как отмечалось выше, этот же эффект имеет место и для других примесей, которые смываются с водосбора, в частности, для мутности и органического вещества. Графики показывают, что до начала половодья в 1998 и 1999 гг. даже небольшая оттепель, вызывающая незначительное повышение расхода воды, приводит к существенному росту концентрации аммония (из рисунка видно, что пики аммония, соответствующие оттепелям, соизмеримы с основным отвечающим половодью пиком), поскольку порции талой воды во время оттепелей сильно загрязнены накопленными за зиму азотсодержащими соединениями. В 1990-е годы получила развитие тенденция к со-

крашению посевных площадей и снижению использования азотных удобрений. Соответствующее падение концентрации аммония прослеживается с конца 1990-х и в начале 2000-х годов, еще до смены методики измерения аммония в 2004 г.

В начале периода наблюдения в течение четырех лет 1997–2000 гг. фиксировались высокие пики аммония в половодье в апреле: 0,67; 0,61; 0,80; 0,69 мг/л соответственно. Следующий высокий пик аммония 0,74 мг/л отмечен в 2003 г. В другие годы половодные пики аммония были меньше 0,4 мг/л.

В межени повышение концентрации аммония происходит во время выпадения дождей. Фоновый уровень аммония в меженные периоды с 1997 г. до половодья 2003 г. составлял 0,1–0,2 мг/л. Далее фон понизился до порога обнаружения 0,05 мг/л, однако здесь могла сыграть роль смена методики измерения аммония после 2003 г.

Химический сток за половодье

Важной характеристикой половодья является сток воды и присутствующих в ней ингредиентов. Обработка данных мониторинга показывает, что сток ингредиентов за одно половодье линейно зависит от стока воды за этот период:

$$M: y = 21995x - 1972,9, R^2 = 0,7628;$$

$$ПО: y = 8570,7x - 278,18, R^2 = 0,9666;$$

$$Цв: y = 45,948x - 2,4599, R^2 = 0,7188;$$

$$Cl^-: y = 8399,7x + 1340,6, R^2 = 0,8122;$$

$$Щ: y = 2602,7x + 93,984, R^2 = 0,9732;$$

$$H^+: y = 15,877x - 0,8224, R^2 = 0,7969;$$

$$Fe: y = 580,25x - 41,462, R^2 = 0,7159;$$

$$NH_4^+ (1997-2003 \text{ гг.}): y = 466,88x - 27,537, R^2 = 0,8865;$$

$$NH_4^+ (2004-2011 \text{ гг.}): y = 82,658x + 4,4412, R^2 = 0,8823,$$

где x – сток воды за половодье, км³;

y – сток соответствующего ингредиента;

R^2 – коэффициент детерминации.

Приняты следующие единицы измерения стока ингредиентов: [сток M, ПО, Cl⁻, Fe, NH₄⁺] = 1 т = 10⁶ г (ПО – в т O₂), [сток Цв] = 1 Град · м³ = 10⁹ град · м³ (градусы Pt–Co шкалы), [сток Щ] = 1 т-экв = 10⁶ г-экв, [сток H⁺] = 1 кмоль = 10³ моль.

Показатели органического вещества ПО и Цв должны быть связаны между собой. Действительно, такая связь обнаруживается, если построить зависимость стока ПО от стока Цв. Если измерять сток Цв (в следующей формуле обозначено как x) в Гград · м³, а сток ПО (y) – в т О₂, то эта зависимость имеет вид: $y = 152,37x + 381,84$; $R^2 = 0,8507$.

Если же привести Цв к единицам ПО (для этого надо разделить коэффициент перед x на 180), то зависимость получится такой: $y = 0,8465x + 381,84$. Здесь учтено, что для московской воды по среднесезонным данным 1 град цветности Pt–Co шкалы равен 0,18 мгО₂/л. Наличие положительного свободного члена в приведенной регрессионной зависимости обусловлено тем, что ПО дополнительно учитывает неокрашенную органику, которая не отслеживается показателем Цв.

Выводы

Проведен анализ изменчивости показателей качества воды в р. Москве (Рублево) в период половодья. Список исследованных показателей включает мутность, цветность, перманганатную окисляемость, щелочность, рН, хлориды, ион аммония, железо, электропроводность. Получены следующие результаты.

Коэффициент цветности, определяемый как отношение показателей Цв и ПО, варьирует в течение года. В период половодья коэффициент цветности находится в пределах 6 ± 2 град/(мгО₂/л), соответственно на 1 град цветности приходится $0,18 \pm 0,06$ мгО₂/л.

Пик ПО опережает пик расхода воды в реке примерно на 2 сут. В этот промежуток дальнейшее нарастание расхода приводит к снижению ПО из-за истощения запаса вымываемого органического вещества на водосборе. На склоне пика расхода происходит повторное повышение ПО, хотя и менее значительное, чем на фронте половодья, что связано с запаздыванием в добегании почвенных вод, насыщенных гумусовыми веществами, в том числе окрашенными. По этой причине повышение цветности на спаде половодья значительнее, чем на его фронте (в отличие от ПО).

Основной вклад в концентрацию железа в речной воде вносят соединения железа, присутствующие на поверхности водосбора в составе подстилки из растительного опада, а также в болотных и грунтовых водах. Содержание этого элемента в грунтовых водах заметно меньше. В половодье рост концентрации железа опережает на 1–2 сут рост расхода воды в реке. На спаде половодья наблюдается вторичное повышение концентрации железа, что связано с более поздним добеганием почвенных вод.

За весь период наблюдения хлориды изменялись в интервале 6,3–28,0 мг/л. Относительно высокий уровень хлоридов в зимний период (15–20 мг/л) обус-

ловлен разгрузкой минерализованных подземных вод. С началом половодья концентрация хлоридов резко снижается до 6–9 мг/л за счет разбавления слабоминерализованными тальми водами. После прохождения половодья восстанавливается более высокая концентрация хлоридов, характерная для меженных периодов, на протяжении которых существенный вклад в речной сток вносят подземные воды.

Щелочность достигает минимальных значений в конце снеготаяния под влиянием накопленных в снеге кислотных примесей. В период снеготаяния волны роста и падения щелочности соответствуют волнам оттепели и похолодания. После окончания снеготаяния щелочность восстанавливается на более высоком уровне. Среднемноголетний скачок щелочности вниз на фронте половодья составляет $1,91 \pm 0,39$ мг-экв/л (среднее \pm стандартное отклонение), а обратный скачок вверх на спаде половодья $1,42 \pm 0,45$ мг-экв/л. Средняя продолжительность всего скачка вниз–вверх $35,4 \pm 7,3$ сут.

Изменение рН подобно изменению логарифма щелочности. Наиболее низкие значения рН достигаются на спаде половодья.

В периоды зимних оттепелей наблюдается рост концентрации иона аммония в речной воде за счет смыва азотсодержащих ингредиентов с поверхности водосбора. Наибольшие концентрации аммония достигаются на фронте половодья. Основной пик аммония опережает пик расхода воды в реке во время половодья примерно на 3 сут. В 1997–2000 гг. пики аммония в половодье фиксировались на уровне 0,6–0,8 мг NH_4^+ /л. В последние годы половодные пики аммония меньше 0,4 мг/л.

Показано, что существует линейная зависимость между химическим стоком за половодье и водным стоком за этот же период. Найдены значения параметров этой зависимости для различных показателей качества воды. Установлена также линейная зависимость между двумя косвенными показателями содержания органического вещества в воде: перманганатной окисляемостью и цветностью воды.

Полученные результаты целесообразно использовать для прогнозирования динамики показателей качества воды в периоды половодья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Долгоносов Б.М., Храменков С.В., Власов Д.Ю., Дятлов Д.В., Сураева Н.О., Григорьева С.В., Корчагин К.А. Прогноз показателей качества воды на входе водопроводной станции // Водоснабжение и санитарная техника. 2004. № 11. С. 15–20.
2. Долгоносов Б.М., Власов Д.Ю., Дятлов Д.В., Сураева Н.О., Григорьева С.В., Корчагин К.А. Статистические характеристики изменчивости качества воды, поступающей на водопроводную станцию // Инженерная экология. 2004. № 3. С. 2–20.
3. Колесников Ю.М., Храменков С.В., Волков В.З., Медведев Л.И. Промывка русла р. Москвы и ее воздействие на экологическую обстановку // Водные ресурсы. 2000. Т. 27. № 4. С. 449–456.

4. Волков В.З., Кузьмина Н.П., Ищенко И.Г. Влияние регулирования весеннего половодья на экологическое состояние р. Москвы // Водоснабжение и санитарная техника. 1999. № 8. С. 6–8.
5. Шевченко М.А. Органические вещества в природной воде и методы их удаления. Киев: Наукова думка, 1966. 135 с.

Сведения об авторах:

Долгоносов Борис Михайлович, д. т. н., заведующий лабораторией моделирования водно-экологических процессов, Институт водных проблем Российской академии наук, 119333, Москва, ул. Губкина, 3; e-mail: borismd@aqua.laser.ru

Корчагин Константин Андреевич, к. ф.-м. н., научный сотрудник, лаборатория моделирования водно-экологических процессов, Институт водных проблем Российской академии наук, 119333, Москва, ул. Губкина, 3; e-mail: kakor@mail.ru