

УДК 582.26:001.891.57

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И РЕГУЛИРОВАНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПРИРОДНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДЕ ВОЛЖСКОГО ИСТОЧНИКА ВОДОСНАБЖЕНИЯ МОСКВЫ*

© 2016 г. Ю.С. Даценко

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет
имени М.В.Ломоносова», Москва, Россия

Ключевые слова: источник водоснабжения, водоснабжение Москвы, водохранилища, цветность, перманганатная окисляемость воды, регулирование качества воды, р. Волга, водохозяйственная система.



Ю.С. Даценко

Установлены основные закономерности трансформации цветности и перманганатной окисляемости воды в водохранилищах системы Волжского источника водоснабжения г. Москвы. Показаны закономерности снижения содержания природного органического вещества по показателям цветности воды и перманганатной окисляемости в отдельных участках системы водоснабжения. Наиболее интенсивная трансформация органического вещества в водохранилищах системы происходит в слабопроточном Учинском водохранилище, при этом максимум снижения величин значений цветности и перманганатной окисляемости наблюдается в весенний период.

На основе анализа многолетних данных наблюдений за качеством воды в водных объектах системы источников водоснабжения разработана схема статистического прогноза цветности и окисляемости воды у водозаборов станций водоподготовки с трехмесячной заблаговременностью. Прогноз базируется на уравнении множественной линейной регрессии, связывающем значения показателей органического вещества в притоках Ивановского водохранилища и у водозаборов станций водоподготовки в замыкающем звене системы – Учинском водохранилище. Проведенная проверка результатов прогноза на независимом материале наблюдений показала удовлетворительную сходимость прогнозных и фактических значений показателей органического вещества. С помощью простой балансовой модели показана возможность управления цветностью вод р. Волги попусками малоцветных вод из Вазузского водохранилища. В результате модельных расчетов получена номограмма, позволяющая рассчитать величину снижения цветности в притоке к Ивановскому водохранилищу в зависимости от разницы цветности вод р. Волги и цветности вод, сбрасываемых из Вазузского водохранилища при заданном соотношении расходов из этих источников.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ. Проект № 14-17-00155

В настоящее время водоснабжение практически всех крупных городов и урбанизированных комплексов мира базируется на использовании водных ресурсов поверхностных источников. Как правило, это речные воды со свойственными им значительными внутри и межгодовыми колебаниями характеристик стока, а также качества воды. Обеспечение гарантированных расходов воды на водоснабжение в этом случае достигается путем создания водохранилищ глубокого сезонного, а часто и многолетнего регулирования стока. Поэтому современные системы источников водоснабжения крупных городов представляют собой сложный комплекс гидротехнических сооружений, насосных станций, каналов, водохранилищ, участков естественных рек и занимают обширные территории [1, 2].

Москва с ближайшими пригородами является крупнейшим водопотребителем. Исторически сложившаяся система водоснабжения города более чем на 99 % использует поверхностные водные объекты – ресурсы рек Москва и Волга. В настоящее время регулирование стока источников водоснабжения обеспечивается сложным водохозяйственным комплексом, состоящим из поочередно создававшихся трех гидротехнических систем – Волжской, Москворецкой и Вазузской.

Вопросы гарантированного количества воды, подаваемой для водоснабжения из водоисточников, всегда были и остаются приоритетными при создании подобных водохозяйственных систем. Однако проблемы количества воды, как правило, решаются единовременно на далекую перспективу а иногда и вовсе теряют свою актуальность в силу различных причин. В отличие от проблем количества воды, вопросы качества постоянно привлекают внимание, поскольку, во-первых, от качества исходной воды для водопроводных станций в значительной степени зависит технологический режим и затраты на водоподготовку; во-вторых, колебания качества воды в широком диапазоне природных условий невозможно регулировать в водоисточниках также, как количество.

Высокая цветность и окисляемость воды – главный недостаток качества воды Волжского источника водоснабжения Москвы. В бассейне Верхней Волги и особенно ее крупнейшего на этом участке притока р. Тверцы расположены крупные болотно-торфяные массивы. Формирование химического стока в таких ландшафтах определяет сложный и трудно предсказуемый характер содержания органического вещества (ОВ) в бассейнах рек в различные фазы гидрологического режима [3, 4]. Этот недостаток был известен еще на стадии проектирования и создания системы водоснабжения столицы волжской водой, однако избежать или ликвидировать его было невозможно из-за чисто природной (ландшафтной) причины повышенного содержания органического вещества в водах Верхней Волги. Однако с раз-

витиём гидротехнической структуры источника водоснабжения и созданием Вазузской системы можно рассмотреть возможность использования регулирования речного стока для улучшения качества воды водоисточника. К сожалению, не только в Волжской системе водоснабжения Москвы, но и при эксплуатации различных гидротехнических систем вопросы качества воды остаются без должного внимания. Достаточно сказать, что существующие правила эксплуатации гидроузлов не содержат рекомендаций по качеству воды, в то время как режим регулирования стока – едва ли не единственный путь антропогенного влияния на процессы трансформации качества воды в водных объектах замедленного водообмена. Кроме того, результаты многолетнего мониторинга качества воды открывают возможность статистического обобщения закономерностей трансформации ОВ в Волжской системе источников водоснабжения. Цель настоящей работы – разработка методов количественной оценки влияния регулирования стока на содержание ОВ в притоке Ивановского водохранилища – р. Волге и метода прогнозирования показателей ОВ у водозаборов станций водоподготовки Волжской системы источников водоснабжения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДИКА

Волжская система водоснабжения Москвы включает водосбор Ивановского водохранилища на Верхней Волге (рис. 1), из которого через канал им. Москвы и ряд небольших водохранилищ водораздельного бьефа канала вода перекачивается в строго охраняемое в санитарном отношении Учинское водохранилище, питающее станции водоподготовки Москвы (рис. 2). Систематические наблюдения в системе Волжского водоисточника начались в 1960 г. Ряды цветности и окисляемости воды использованы для разработки прогноза показателей органического вещества водоисточника. До 2008 г. система мониторинга Волжского водоисточника, осуществляемая лабораториями Мосводоканала, включала 12 пунктов (рис. 1, 2).

В притоках Ивановского водохранилища и канале им. Москвы частота наблюдений за цветностью и окисляемостью составляла два раза в месяц. Для семи пунктов водоисточника были подготовлены однородные многолетние ряды цветности и окисляемости воды, которые использованы для статистического анализа трансформации и разработки прогноза показателей органического вещества Волжского водоисточника г. Москвы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В основных водных объектах Волжского источника водоснабжения происходит существенное снижение среднемноголетних значений рассматриваемых показателей качества воды по мере перемещения речных вод Волги к водозабрам станций. Величина удерживающей способности (рассчиты-



ваемой по относительной убыли среднееголетнего содержания ОВ или значения показателя качества воды в водном объекте) различается в отдельных участках системы (таблица).

Таблица. Изменение среднееголетних значений показателей органического вещества в различных участках Волжского источника водоснабжения г. Москвы

Участок системы	Цветность воды, градусы	Перманганатная окисляемость, мгО/л	Мутность, мг/л
Иваньковское водохранилище	3	1,4	17,5
Канал им. Москвы	13	8,3	15,8
Учинское водохранилище	21	10,9	42,0
Вся система (от Верхней Волги до водозаборов)	34	19,4	59,0

Главным фактором процесса снижения содержания ОВ является интенсивность водообмена водоема (или участка системы), поэтому наибольший эффект снижения содержания ОВ наблюдается в Учинском водохранилище, характеризующемся самым низким коэффициентом водообмена [5]. Проточность водохранилищ водораздельного бьефа вместе с каналом им. Москвы близка проточности Иваньковского водохранилища, но степень снижения цветности и перманганатной окисляемости вод (ПО) в них намного выше. Это объясняется наличием в Иваньковском водохранилище дополнительных источников повышенных значений содержания ОВ, а именно – впадающих в водохранилище ниже створа д. Городня рек Орша и Созь, дренирующих обширные торфяные массивы.

Анализ сезонных изменений удерживающей способности по ОВ показал, что в водохранилищах водораздельного бьефа и в Учинском водохранилище максимальные значения наблюдаются весной в период высокой мутности, когда водохранилища заполнены содержащими большое количество взвешенных веществ водами половодья. Весенние взвеси способствуют коагуляции веществ в водохранилищах, когда в процессе сорбции и осаждения вместе с взвесью из водной толщи водоемов удаляются как органические, так и минеральные вещества. Статистические связи между мутностью и удерживающей способностью по ОВ характеризуются значимыми коэффициентами корреляции, высокими в Иваньковском водохранилище (0,81) и минимальными в Учинском (0,67), где при замедленном водообмене в большей степени проявляются другие факторы самоочищения экосисте-

мы от органического вещества – фотоокисление, бактериальное окисление. Определенное значение может иметь также и новообразование гумифицированного органического вещества в результате отмирания высшей водной растительности, поэтому связь удерживающей способности водохранилища ПО с мутностью слабее связи снижения цветности с мутностью.

В практике водоподготовки чрезвычайно важное значение имеет прогноз цветности и окисляемости в исходной для станций воде. Главный фактор, определяющий колебания стока органического вещества в бассейне Верхней Волги – изменение величины водного стока [6]. При отсутствии долгосрочных прогнозов стока единственно возможный путь разработки алгоритма прогноза – поиск статистических зависимостей между показателями качества воды, основанных на оценках времени добегания воды. По воднобалансовым характеристикам водных объектов системы водоснабжения, а также в результате анализа взаимокорреляционных функций колебаний цветности и ПО время добегания воды от входного створа Ивановского водохранилища до водозаборов водопроводных станций оценивается примерно в три месяца. В такой схеме прогноза предикторами могут быть значения прогнозируемых показателей, полученные на наиболее удаленных от водозаборов водопроводных станций пунктах водоисточника: р. Волга – г. Тверь и р. Тверца – г. Тверь, а также пункт на Ивановском водохранилище ниже слияния рек Волги и Тверцы у д. Городня. Однако на тесноту статистических связей существенно влияет выявленная ранее потеря сезонной цикличности в колебаниях показателей у водозаборов. Поэтому при поиске регрессионных зависимостей исключен годовой ход среднемноголетних значений прогнозируемых показателей. В результате получены ряды значений отклонений цветности и окисляемости от месячных норм, которые и использовались для корреляционного анализа. Полученные уравнения регрессии позволяют прогнозировать величину цветности у водозаборов станций Учинского водохранилища со стандартной ошибкой 5 градусов цветности и 1,1 мгО/л ПО.

Уравнения множественной линейной регрессии, соответствующие выбранным схемам прогноза для водозабора водопроводной станции, расположенного на Учинском водохранилище у Листвянской ГЭС имеют следующий вид:

$$\Delta C_{\text{ЛГЭС}} = 0,216 \Delta C_{\text{Гор}} + 0,187 \Delta C_{\text{Т}} + 0,102 \Delta C_{\text{В}} \quad (1)$$

$$\Delta \text{ПО}_{\text{ЛГЭС}} = 0,292 \Delta \text{ПО}_{\text{Гор}} + 0,182 \Delta \text{ПО}_{\text{В}} + 0,055 \Delta \text{ПО}_{\text{Т}} \quad (2)$$

Пример расчета цветности для водозабора ЛГЭС за 2003–2004 гг. приведен на рис. 3.

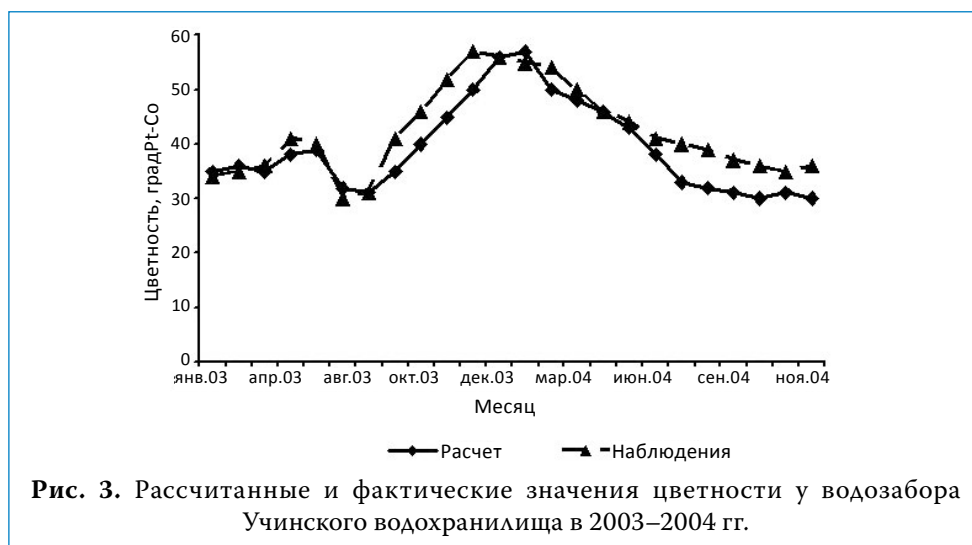


Рис. 3. Рассчитанные и фактические значения цветности у водозабора Учинского водохранилища в 2003–2004 гг.

С созданием Вазузской гидротехнической системы (ВГТС) в системе источников водоснабжения Москвы возникла уникальная возможность крупномасштабного регулирования качества воды в Волжской системе путем использования водных ресурсов созданной ВГТС. Возможность направленного воздействия на качество воды этого участка водоисточника основана на разбавлении высокоцветных вод Верхней Волги относительно малоцветными водами попусков из Вазузского водохранилища, что приводит к снижению цветности и окисляемости воды. Сбросами Вазузского водохранилища разбавляются воды участка р. Волги от истока до г. Зубцова, а именно на этом верхнем участке волжской части водосбора Иваньковского водохранилища притоки Волги оказывают наиболее существенное влияние на формирование стока органического вещества. В результате специального экспедиционного обследования притоки Волги были ранжированы по степени влияния на цветность вод и ПО Волги с учетом их водности.

Ниже г. Ржева Волга принимает сравнительно небольшое количество притоков – реки Бойня, Вазуза, Держа, Холохольня и уже перед Тверью – самый крупный приток Волги на этом участке р. Тьма. Эти притоки, в отличие от притоков верхнего участка, характеризуются сравнительно невысокими и мало изменяющимися значениями цветности и ПО. Цветность вод Вазузского водохранилища даже в периоды половодья не превышает 40 град., что значительно ниже, чем в эти же периоды в р. Волге выше г. Зубцова.

Для оценки влияния попусков Вазузского водохранилища на цветность воды, поступающей в Иваньковское водохранилище, использована простая балансовая модель. Величину снижения цветности и окисляемости

воды в Волге у г. Твери можно рассчитать из уравнения баланса цветности при полном перемешивании вод притоков. Это уравнение для рассматриваемого участка речной системы имеет вид

$$C_{\text{ВТ}} = \frac{C_{\text{р}} + \lambda \cdot \omega \cdot C_{\text{БОК}} + \alpha \cdot C_{\text{В}}}{1 + \lambda + \alpha}, \quad (3)$$

где $C_{\text{ВТ}}$ – цветность вод р. Волги у г. Твери;

$C_{\text{р}}$ – цветность вод р. Волги у г. Зубцова;

$C_{\text{БОК}}$ – цветность вод условного потока, образованного слиянием боковых притоков на участке Волги от г. Зубцова до Твери;

$C_{\text{В}}$ – цветность вод, сбрасываемая из Вазузского водохранилища;

λ – отношение расхода воды притоков р. Волги ниже г. Зубцова к расходу воды Волги у г. Тверь;

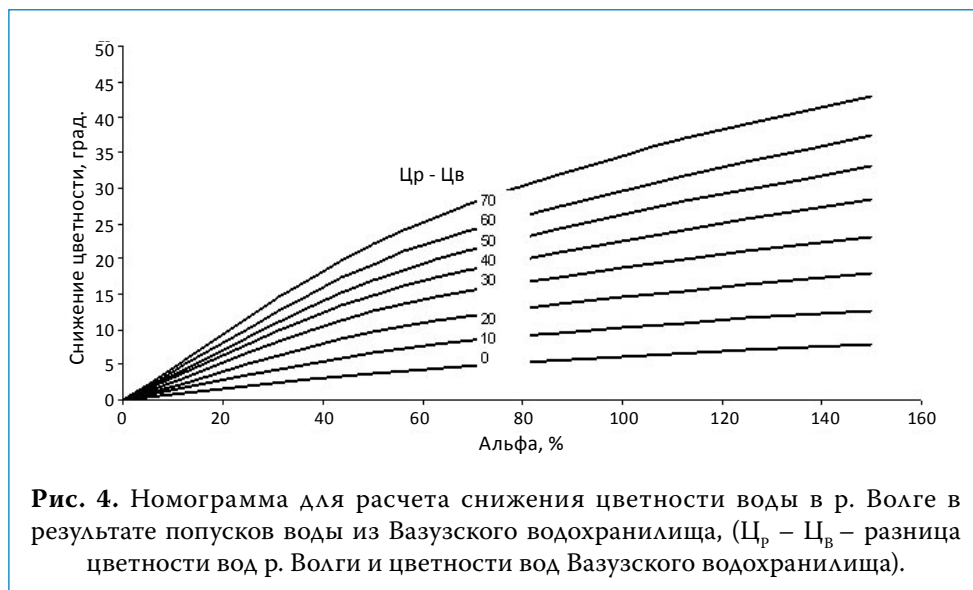
ω – среднесноголетнее отношение цветности вод притоков р. Волги ниже г. Зубцова к цветности воды р. Волги у г. Зубцова;

α – параметр управления качеством воды, равный отношению попуска из Вазузского водохранилища к расходу воды в створе г. Тверь.

Допущением приведенной балансовой модели является предположение о постоянстве величин ω и λ в период регулирования качества воды. Наиболее вероятным периодом регулирования предполагается осенний период, поскольку именно в это время актуально направленное снижение цветности вод водоисточника после высоких осенних паводков на Верхней Волге. В этот период расходы воды Волги изменяются, как правило, незначительно, поэтому данное допущение вполне приемлемо. В связи с отсутствием оперативной информации об изменениях цветности и окисляемости вод в модели предполагалось постоянство их значений в притоках Волги и в сбросах из Вазузского водохранилища в период регулирования. Для расчета использованы значения параметров λ и ω , полученные обобщением многолетних данных о соотношении расходов воды в притоках Ивановского водохранилища и данных экспедиционных обследований Верхней Волги.

Для градаций цветности, сбрасываемой из водохранилища в диапазоне 10–50 градусов, что соответствует реальным колебаниям цветности вазузских вод, получена номограмма, позволяющая оценить величину снижения цветности волжских вод на участке между створами г. Зубцова и Твери в зависимости от разницы цветности вод р. Волги и цветности вод Вазузского водохранилища (рис. 4).

Для наиболее вероятных ситуаций, когда величина α не превышает 0,3, снижение цветности может составлять 8–10 градусов, что приводит к существенной экономии коагулянта при водоподготовке на станциях Волжского источника водоснабжения г. Москвы.



ВЫВОДЫ

В водохранилищах Волжского источника водоснабжения г. Москвы происходит существенное снижение содержания природного органического вещества – главного недостатка качества воды Волжского источника водоснабжения столицы. Степень улучшения качества воды зависит от интенсивности водообмена водохранилища и максимальна в Учинском водохранилище. На основе регрессионной связи показателей содержания органического вещества в воде притоков Иваньковского водохранилища с этими показателями у водозаборов станций водоподготовки впервые для источника водоснабжения разработана методика прогноза цветности и перманганатной окисляемости вод. Анализ балансовых соотношений расходов воды на участке в районе г. Зубцова позволил обосновать возможность направленного регулирования цветности воды в бассейне Иваньковского водохранилища, которое может быть достигнуто попусками воды из Вазузского водохранилища. Эффективность такого регулирования цветности рассчитывается в зависимости от соотношения величины попуска из водохранилища и расхода Волги у г. Ржева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авакян А.Б., Кочарян А.Г., Майрановский Ф.Г. Влияние водохранилищ на трансформацию химического стока // Водные ресурсы. 1994. № 2. С. 144–153.
2. Эдельштейн К.К. Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 277 с.

3. Роцуипко В.Ф. Литвинов А.С. Многолетние колебания цветности и перманганатной окисляемости в основных притоках Ивановского водохранилища // Водные ресурсы. 1985. № 3. С. 102–109.
4. Скопинцев Б.А. Органическое вещество в воде Волги и ее водохранилищ // Биологические продукционные процессы в бассейне Волги. Л.: Наука, 1976. С. 25–40.
5. Даценко Ю.С. Трансформация стока и состава органического вещества в московской системе водоснабжения г. Москвы // Водное хозяйство России. 2009. № 2. С. 26–34.
6. Даценко Ю.С. К вопросу о связи стока притоков и цветности вод Ивановского водохранилища // Тр. ВНИИ ВОДГЕО. 1977. Вып. 69. С. 154–162.

Сведения об авторе:

Даценко Юрий Сергеевич, канд. геогр. наук, доцент, старший научный сотрудник, географический факультет, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1; e-mail: yuri0548@mail.ru