

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 556.551:556.06

Ю.С. Даценко<sup>1</sup>**МОДЕЛИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРЕБЫВАНИЯ ВОДНЫХ МАСС**

На примере расчета концентраций хлоридов и общего фосфора у водозабора станции водоподготовки на Учинском водохранилище (Московская область) показана возможность применения методов динамики линейных систем для оценки степени трансформации качества воды в водохранилищах и расчета изменений как консервативных, так и неконсервативных показателей качества воды.

*Ключевые слова:* Учинское водохранилище, показатели химического состава воды, внутренний водообмен, динамика линейных систем

**Введение.** Решение задачи о расчете качества воды в нижнем бьефе водохранилищ или у водозаборных сооружений требует, прежде всего, детального описания процесса внутреннего водообмена, поскольку глубину физико-химической и биохимической трансформации веществ определяет время их пребывания в водоеме. Классический подход описания процессов трансформации качества воды с учетом внутреннего водообмена основан на интегрировании систем уравнений гидродинамики и химической кинетики. Сложности реализации этого подхода в условиях природных водоемов замедленного водообмена достаточно хорошо известны [Подгорный, 2003; Иваненко с соавт., 2002]. Однако в ряде случаев полноценной заменой этого подхода могут выступить упрощенные методы расчета внутреннего водообмена, в частности анализ линейной динамической системы, в качестве которой можно рассматривать водоем. В гидрологии для расчета трансформации паводочной волны применяется функция влияния, характеризующая реакцию водосбора на импульсное воздействие [Аполлов с соавт., 1974; Кучмент, 1972]. При описании процессов внутреннего водообмена водохранилища аналогом такой характеристики служит функция распределения времени пребывания (РВП) воды в водоеме [Гордин, Кочарян, 1978]. Реакция водоема на импульсное входное воздействие интегрально отражает особенности структуры течений и внутреннего водообмена в водохранилище. В кибернетическом аспекте функция РВП эквивалентна импульсной переходной функции динамической системы [Кафаров, 1976].

При известной функции РВП  $S(t)$  и известном характере временных изменений концентраций показателей химического состава воды, поступающей в водоем –  $C_{\text{вх}}(t)$ , однозначно рассчитать его концентрации на выходе водоема можно через интеграл свертки (интеграл Дюамеля):

$$C_{\text{вых}}(t) = \int_0^{\infty} C_{\text{вх}} \cdot S(t - \tau) d\tau, \quad (1)$$

где  $\tau$  – параметр сдвига каждого импульса,  $S$  – ордината кривой РВП,  $C_{\text{вх}}$  – концентрация показателя химического состава воды.

В этом случае режим изменения концентрации вещества на выходе из системы будет рассчитываться с учетом особенностей внутреннего водообмена, определяющих время трансформации химических веществ в водоеме.

В данной работе методика определения концентрации химического вещества на выходе из водохранилища реализована на примере расчета концентрации консервативного показателя – хлоридов в Учинском водохранилище – одном из водохранилищ системы водораздельного бьефа канала им. Москвы Волжского источника водоснабжения Москвы. Расположенное на севере Московской области, это водохранилище (полный объем 146 млн м<sup>3</sup>, площадь водной поверхности – 19 км<sup>2</sup>, средняя глубина – 7,7 м) характеризуется сложным рельефом ложа, поскольку образовано при затоплении речной долины в месте слияния двух рек – Вязи и Учи. В центральной и приплотинной частях водохранилища расположены водозаборы двух крупных станций водоподготовки системы водоснабжения г. Москвы, поэтому оценки процессов трансформации качества воды в нем весьма актуальны. Расчеты проводились для одного из водозаборов – водозабора Восточной станции водоподготовки (ВСВ), расположенного в приплотинном участке водохранилища [Даценко, 1984].

**Материал и методика.** Экспериментальной основой определения функции РВП Учинского водохранилища послужили гидравлические исследования, проведенные на физической модели водохранилища (горизонтальный масштаб модели 1:1000) с

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор, докт. геогр. н.; e-mail: yuri0548@mail.ru

учетом масштабных искажений при различных форсировках расходов воды. Модель создана автором на базе Акуловского гидроузла Мосводоканала. Проведенные на гидравлической модели эксперименты предусматривали получение кривых отклика гидродинамической системы на ввод химического индикатора, в качестве которого использовался аналитически легко определяемый краситель – флуоресцеин. Опыт подобных трассировочных экспериментов, накопленный в химической технологии и технологии очистки сточных вод, успешно применялся и при гидравлических экспериментах в гидрологии. Для пересчета модельного времени в реальное использовалась методика, принятая в Институте Гидропроект, подробно изложенная в работе А.Г. Кочаряна [1975]. Для водозабора ВСВ нормированная кривая отклика на импульсное воздействие в виде мгновенного ввода в модель флуоресцеина, полученная на гидравлической модели, имеет вид, показанный на рис. 1.

Альтернативой гидравлическому методу расчета функции РВП могут служить натурные трассерные эксперименты на водохранилище. Однако для сравнительно крупных водоемов, при очень большом разбавлении начальной массы вещества-трассера очень трудно подобрать надежно определяемое вещество. Для Учинского водохранилища такую проверку результатов гидравлических проводили путем установления времени добега от входного створа до водозабора растворенного в воде гелия, инструментально контролируемого с высокой чувствительностью [Яницкий, 1979]. Полученное по концентрации гелия время добега до водозабора отличалось от рассчитанного гидравлическим моделированием не более чем на 2 суток, что может быть косвенным подтверждением адекватности полученной кривой РВП водных масс в Учинском водохранилище.

**Результаты и их обсуждение.** Комплекс методологических и технических проблем, связанных с постановкой любого подобного эксперимента на-

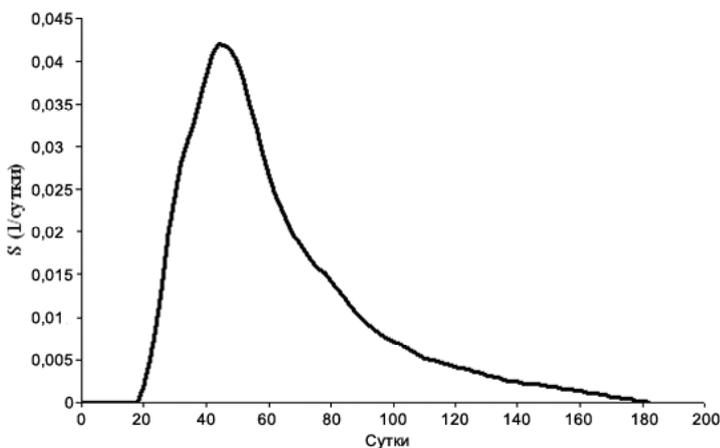


Рис. 1. Кривая отклика водозабора ВСВ на Учинском водохранилище

Fig. 1. The response curve of WTP intake in the Uchinsk reservoir

столько сложен, что получаемые результаты всегда требуют тщательной проверки. Эта проверка проводилась путем расчета концентраций консервативного показателя качества воды – хлоридов. В действовавшей системе мониторинга качества воды Волжского источника водоснабжения г. Москвы наиболее широкий набор показателей качества воды контролировался в 80-е годы прошлого столетия. Концентрации хлоридов во входном створе Учинского водохранилища (Пестово) и у водозабора у ВСВ наблюдались в этот период еженедельно. Входная информация о концентрации хлоридов путем интерполяции, также как и ординаты функции РВП задавались для расчетов с шагом 2 суток. В результате вычисления интеграла свертки были получены значения концентраций хлоридов в выходном створе Учинского водохранилища – у ЛГЭС за период, который начинается с конечного значения функции РВП. Длина временного периода функции РВП Учинского водохранилища составляет 92 значения, то есть 184 дня. В предварительных расчетах мы использовали интервал расчета, равным полутора годам (июль 1995 г. – декабрь 1996 г.); результаты расчетов сопоставлялись с данными наблюдений (рис. 2). Как видно, использование функции распределения времени пребывания воды в водохранилище позволяет вполне удовлетворительно описать внутригодовые изменения консервативного показателя в Учинском водохранилище. Расчетная кривая сглаживает фактические наблюдения, и изменения хлоридов по расчету происходят более плавно. Однако отклонения фактических и рассчитанных значений невелики. Максимальное отклонение составляет 1,1 мг/л, а среднее отклонение всего 0,4 мг/л. Известный критерий качества модельных расчетов  $S/\sigma$  равен 0,20, что соответствует очень высокой достоверности расчетов по примененной модели.

Эта методика была применена для расчета по интегралу свертки изменения концентраций неконсервативного показателя – величины общего фосфора. В этом случае в расчетах необходимо учитывать изменение концентраций химических веществ в результате внутриводоемной трансформации. Для большинства показателей химического состава природных вод вполне приемлемым приближением описания их внутриводоемной трансформации считается изменение концентрации по кинетическому уравнению мономолекулярной реакции. В наших расчетах уменьшение концентрации фосфора в водохранилище описывалось уравнением кинетики первого порядка, которое добавлялось в подынтегральное выражение интеграла (1). Коэффициент уменьшения содержания фосфора в этом кинетическом уравнении идентичен коэффициенту седиментации в классических балансовых уравнениях фосфора. Его величина оценивалась по расчетам внешнего баланса фосфора в Учинском водохранилище за период 1983–1985 гг. и составила  $-0,0011$  1/сут.

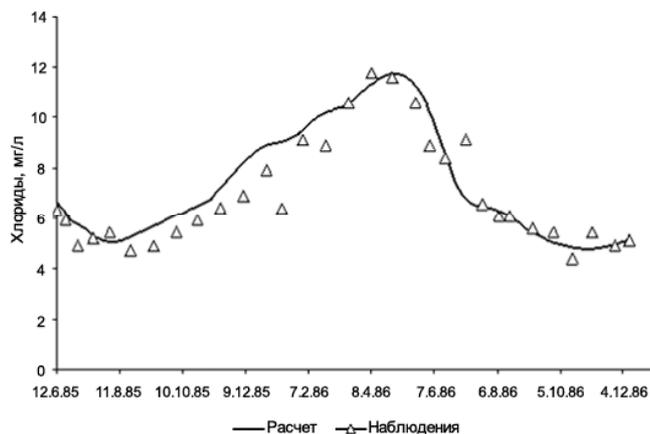


Рис. 2. Рассчитанные и измеренные значения концентраций хлоридов у водозабора ВСВ в Учинском водохранилище

Fig. 2. Calculated and measured concentrations of chlorides at the WTP intake in the Uchinsk reservoir

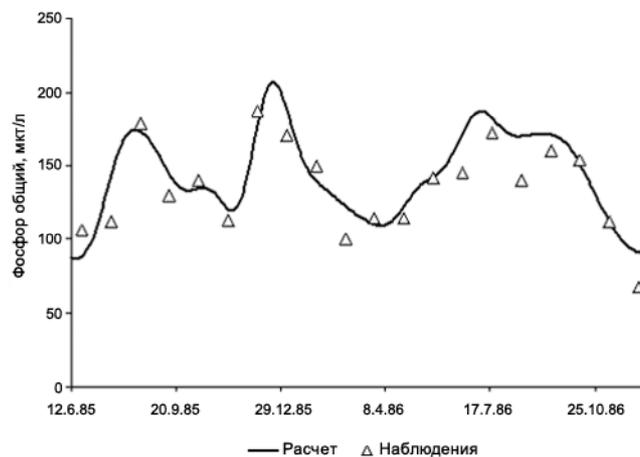


Рис. 3. Рассчитанные и измеренные значения концентраций общего фосфора у водозабора ВСВ в Учинском водохранилище

Fig. 3. Calculated and measured concentrations of total phosphorus at the WTP intake in the Uchinsk reservoir

Расчет общего фосфора для календарного 1986 г. проведен по данным наблюдений с частотой 2 раза в месяц за концентрациями общего фосфора во входном створе Учинского водохранилища – Пестово и на водозаборе ЛГЭС. Концентрации общего фосфора во входном створе интерполировались по данным наблюдений для получения ряда входных значений.

Расчетные изменения концентраций общего фосфора в Учинском водохранилище сопоставлялись с данными наблюдений у ЛГЭС. Результаты расчета представлены на рис. 3.

Критерий качества расчета  $S/\sigma$ , равный 0,42, для общего фосфора оказался значительно выше, чем для хлоридов. Понижение точности расчетов обусловлено явным упрощением описания трансформации активного биогенного элемента – общего фосфора в водоеме. Использованная в расчетах простая кинетика первого порядка – основная причина наблюдаемых различий расчетных и фактических значений. Тем не менее, общие черты изменений общего фосфора удовлетворительно воспроизводятся с помощью такой модели, поскольку, как уже показано на примере консервативных хлоридов, особенности внутреннего водообмена, существенно влияющие на время пребывания веществ в водоеме и определяющие глубину физико-хими-

ческих и биохимических процессов в экосистеме водохранилища, вполне адекватно описываются кривой РВП.

Таким образом, при экспериментальном определении функции отклика водохранилища на импульсное воздействие для водозабора, расположенного в любом месте водохранилища, можно ориентировочно рассчитать временной ход концентрации как консервативного, так и неконсервативного вещества в воде, забираемой из водохранилища. Исходными данными для такого расчета служат результаты мониторинга качества воды, поступающей в водоем.

### Выводы

Для приближенных расчетов степени трансформации качества воды в природных водоемах, характеризующихся сложной структурой внутреннего водообмена, удовлетворительной заменой классического подхода, состоящего в решении систем дифференциальных уравнений, может служить упрощенный расчет режима показателей качества воды с помощью интеграла свертки. Этот расчет основан на использовании функции отклика водоема на импульсное воздействие, которое характеризует распределение времени пребывания воды в водоеме и интегрально отражает особенности структуры его внутреннего водообмена.

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет гранта РНФ № 17-77-30006.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. Л.: Гидрометеоздат, 1974. 419 с.  
 Гордин И.В., Кочарян А.Г. Функции распределения времени пребывания водных масс в водохранилищах // Водные ресурсы. 1978. № 1. С. 104–113.  
 Даценко Ю.С. Гидрохимический режим Учинского водохранилища // Водные ресурсы. 1984. № 2. С. 54–63.

Иваненко С.А., Корявов П.П. Динамика вод и распространение загрязняющих веществ в водохранилище // Математическое моделирование. 2002. Вып. 14. № 6. С. 105–118.  
 Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.: Химия, 1976. 464 с.  
 Кочарян А.Г. Применение гидравлического моделирования при прогнозировании качества воды в проектируемых во-

дохранилищах (на примере водохранилища на р. Томь) // Водные ресурсы. 1975. № 4. С. 152–159.

*Кучмент Л.С.* Математическое моделирование речного стока. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 191 с.

*Подгорный К.А.* Математическое моделирование пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов (алгоритмы и численные методы). Рыбинск, 2003. 327 с.

*Яницкий И.Н.* Гелиевая съемка. М.: Недра, 1979. 96 с.

Поступила в редакцию 01.03.2018

После доработки 15.09.2018

Принята к публикации 08.10.2018

**Datsenko Y.S.<sup>1</sup>**

**THE RESERVOIR WATER QUALITY MODELING USING  
THE FUNCTION OF WATER MASSES RESIDENCE TIME DISTRIBUTION**

Calculation of chlorides and total phosphorus concentrations at the water intake of the water treatment plant (WTP) at the Uchinsk reservoir (the Moscow oblast), exemplifies that the methods of linear systems dynamics could be applied to assess the degree of water quality transformation in the reservoirs and to calculate changes in both conservative and non-conservative water quality indicators.

*Key words:* the Uchinsk reservoir, indicators of the chemical composition of water, internal water exchange, linear systems dynamics

*Acknowledgements.* The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project № 17-77-30006).

REFERENCES

*Apollov B.A., Kalinin G.P., Komarov V.D.* Kurs gidrologicheskikh prognozov [Course on hydrological forecasts]. L.: Gidrometeoizdat, 1974. 419 s. (in Russian).

*Dacenko Ju.S.* Gidrohimicheskij rezhim Uchinskogo vodohranilishha [Hydrochemical regime of the Uchinsk reservoir] // Vodnye resursy. 1984. № 2. S. 54–63 (in Russian).

*Gordin I.V., Kocharjan A.G.* Funkcii raspredelenija vremeni prebyvaniya vodnyh mass v vodohranilishhah [Functions of water masses residence time distribution in reservoirs] // Vodnye resursy. 1978. № 1. S. 104–113 (in Russian).

*Ivanenko S.A., Korjavov P.P.* Dinamika vod i rasprostranenie zagriznjajushhikh veshhestv v vodohranilishhe [Water dynamics and propagation of pollutants in a reservoir] // Matem. Modelirovanie. 2002. V. 14. № 6. S. 105–118 (in Russian).

*Janickij I.N.* Geliievaja s'emka [Helium survey]. M.: Nedra, 1979. 96 s. (in Russian).

*Kafarov V.V.* Metody kibernetiki v himii i himicheskoj tehnologii [Cybernetics techniques in chemistry and chemical technology]. M.: Himija, 1976. 464 s.

*Kocharjan A.G.* Primenenie gidravlicheskogo modelirovanija pri prognozirovanii kachestva vody v proektiruemyh vodohranilishhah (na primere vodohranilishha na r. Tom') [Application of hydraulic modeling for water quality forecasting in designed reservoirs (case study of a reservoir on the Tom River)] // Vodnye resursy. 1975. № 4. S. 152–159 (in Russian).

*Kuchment L.S.* Matematicheskoe modelirovanie rechnogo stoka [Mathematic modeling of river runoff]. L.: Gidrometeoizdat, 1972. 191 s. (in Russian).

*Podgornyj K.A.* Matematicheskoe modelirovanie presnovodnyh jekosistem nestratificirovannyh vodoemov (algoritmy i chislennye metody) [Mathematic modeling of freshwater ecosystems in unstratified water reservoirs]. Rybinsk. 2003. 327 s. (in Russian).

Received 01.03.2018

Revised 15.09.2018

Accepted 08.10.2018

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology, Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: yuri0548@mail.ru