

УДК 519.8

А.А. Цхай

Математическое моделирование качества воды в проектируемом водохранилище на основе модели РК-БПК

А.А. Tskhay

Water Quality Mathematical Modeling for the Design Reservoir on the Basis DO-BOD Model

Представлены результаты сравнения прогноза качества воды в проектируемом Богучанском водохранилище для двух модельных вариантов его создания.

Ключевые слова: математическое моделирование, качество воды, загрязнение, водохранилище.

Практическое использование данных мониторинга речных бассейнов началось с предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, например, техногенных катастроф вследствие антропогенной деятельности на водосборах (см., например: [1, с. 20]). Однако у мониторинговых данных скоро обнаружилось и другое приложение: служить информационной базой прогнозирования экологических последствий зарегулирования рек.

Наиболее простым и в то же время информативным методом расчета и прогнозирования качества воды в водоемах и водотоках являются модели типа РК-БПК, предложенные в свое время Стритером и Фелпсом (см., например: [2, с. 68]).

В моделях этого типа предлагается учитывать широкий спектр легкоокисляемых органических соединений, находящихся в воде, введением некой единой субстанции, именуемой биохимической потребностью в кислороде (БПК). Простота измерения биохимической потребности в кислороде и растворенном кислороде (РК), наглядность и доступность данных делают этот метод одним из стандартных средств анализа качества воды. Величину биохимической потребности в кислороде определяют путем измерения суммарного потребления кислорода в течение заданного момента времени, обычно это 5 или 20 суток. В зависимости от этого часто используют обозначение БПК₅ или БПК₂₀.

При формулировке модели и расчетах по ней все предположения были сделаны таким образом, чтобы получить оценку снизу для кислородного режима. Другими словами, в работе представлена ситуация, при которой расчетная концентрация растворенного кислорода во все моменты времени будет ниже или совпадать с реальной. Концентрация биохимической потребности в кислороде оценивалась наоборот сверху. Использование этого подхода

There are presented comparison results of water quality forecast for two variants of the design Boguchanskoye reservoir creation.

Key words: mathematical modeling, water quality, pollution, reservoir.

позволяет получить при расчетах наиболее неблагоприятный случай динамики параметров качества воды в проектируемом водохранилище.

В работе используется модификация модели РК-БПК в приближении кинетики первого порядка.

В пренебрежении продольной дисперсии примеси для случая неустановившегося движения воды и нестационарных кинетических процессов уравнения модели РК-БПК выглядят следующим образом

$$\begin{aligned}\frac{\partial(C \cdot w)}{\partial t} &= -\frac{\partial(C \cdot Q)}{\partial x} - (K_1 + K_3) \cdot C \cdot w + G, \\ \frac{\partial(D \cdot w)}{\partial t} &= -\frac{\partial(D \cdot Q)}{\partial x} - K_2 \cdot D \cdot w + K_1 \cdot C \cdot w + J \cdot B.\end{aligned}\quad (1)$$

где t – время, с; $C(x, t)$ – концентрация биохимической потребности в кислороде в водохранилище, г/м³; $D(x, t)$ – дефицит кислорода, г/м³; x – продольная координата вдоль русла, м; Q – расход воды, м³/с; B – ширина свободной поверхности водотока, м; w – площадь поперечного сечения водотока, м²; u – средняя по сечению скорость водотока, м/с; G_j – путевая нагрузка загрязнений на единицу длины водотока, г/м·с; J – плотность кислородного потока, обусловленного фотосинтезом и поглощением донными отложениями, г/м²·с; K_1 – коэффициент биохимического распада биохимической потребности в кислороде, с⁻¹; K_2 – коэффициент реаэрации, с⁻¹; K_3 – коэффициент физического удаления биохимической потребности в кислороде, с⁻¹.

Дефицит кислорода $D(x, t)$ определяется как

$$D = O_{2s} - O_2, \quad (2)$$

где O_2 – содержание кислорода в воде, г/м³; O_{2s} – предельная равновесная концентрация кисло-

рода в воде, г/м^3 – может быть определена из эмпирического уравнения (см., например: [2, с. 69])

$$O_{2S} = 14,61996 - 0,4042 \cdot T - 0,00842 \cdot T^2 - 9 \cdot 10^{-5} \cdot T^3. \quad (3)$$

Предполагается справедливой зависимость типа Аррениуса для коэффициентов реакции первого порядка K_j .

Одной из самых серьезных проблем при использовании математических моделей в задачах прогнозирования является определение параметров или идентификация. Ввиду того, что исследуемый объект – Богучанское водохранилище – не существует в природе, нельзя говорить о процедуре идентификации в полном смысле этого слова. Поэтому для определения констант модели приходится пользоваться характеристиками водоемов-аналогов. В качестве водоема-аналога далее рассматривается Усть-Илимское водохранилище, сходное с проектируемым Богучанским по физико-географическим условиям, расположенное в той же природной зоне, имеющее близкие по величине значения характерных параметров.

Для идентификации модели РК-БПК использовалось аналитическое решение системы уравнений (1) в стационарном случае с постоянными коэффициентами. Значения искомых параметров K_{0j} , G , J оценивались применением метода Маквардта – градиентного метода наименьших квадратов.

В качестве критерия близости расчетных и натурных данных распределения концентраций растворенного кислорода и биохимической потребности в кислороде использовался критерий Тейла (4).

$$F = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n X_i^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^n Y_i^2}}, \quad (4)$$

где n – число наблюдений; X_i и Y_i – соответственно расчетные и измеренные величины содержания веществ, г/м^3 .

В расчетах использовались данные многолетних наблюдений постов Росгидромета на Моргудольском, Ершовском и Воробьевском участках Усть-Илимского водохранилища.

В результате калибровки модели были получены следующие значения параметров $K_{01} = 0,0024 \text{ с}^{-1}$; $K_{02} = 0,1062 \text{ с}^{-1}$; $K_{03} = 0,0064 \text{ с}^{-1}$; $G/w_0 = 0,008 \text{ мг/л} \cdot \text{с}$; $JB_0/w_0 = 0,157 \text{ мг/л} \cdot \text{с}$; где w_0 и B_0 – средние площадь сечения и ширина свободной поверхности на участке водохранилища, выбранном для идентификации.

Соответствующие значения критерия Тейла – 0,13 и 0,22, что характеризует достаточную для экологических моделей точность.

Обращает на себя внимание довольно низкое значение коэффициента K_{01} , характеризующего процесс биохимического распада биохимической потребности в кислороде, что, возможно, связано с общим высоким уровнем загрязнения вод Усть-Илимского водохранилища. Очистение воды от органики происходит в большей степени благодаря процессам физического удаления биохимической потребности в кислороде (седиментация, адсорбция). Значение коэффициента K_{02} характеризует достаточно высокий уровень азрации водохранилища в исследуемый период. Величина путевой нагрузки (параметр G) на участке, выбранном для идентификации, – на уровне природной, фоновой в отсутствие мощных источников сбросов или хозяйственно-бытовых стоков. Баланс потоков кислорода – величина J – свидетельствует об активности процессов потребления кислорода донными отложениями в силу благоприятных условий для жизнедеятельности придонной биоты. В целом можно сделать вывод о значительной роли придонных процессов в самоочищении вод Усть-Илимского водохранилища.

Перед разработчиками модели был поставлен вопрос о сравнении характеристик качества воды для двух проектных вариантов эксплуатации Богучанского гидроузла. Первый из них соответствовал графику эксплуатации с НПУ, равным 208 м БС, второй же – с НПУ, равным 173 м БС. Для ответа на поставленные предварительные вопросы было достаточно использовать простейшее нульмерное модельное приближение. Начальные условия для системы (1) были найдены из предположения о замыкании годовых циклов при проведении расчетов для ряда лет с одинаковым внешним воздействием на экосистему водохранилища.

Содержание растворенного кислорода и биохимической потребности в кислороде в основном притоке водохранилища – Ангаре – было выбрано по данным поста наблюдений за качеством воды Росгидромета в 1986 г. в створе «р. Ангара – г. Усть-Илимск, 10 км ниже сбросов УИЛПК» с тем, чтобы основной сосредоточенный источник загрязнений – сбросы Усть-Илимска и Усть-Илимского лесопромышленного комплекса – учесть с притоком в проектируемое Богучанское водохранилище.

Ввиду отсутствия гидрохимических данных для Ангара в районе с. Кежма – зоне выклинивания подпора водохранилища при НПУ 173 м БС – концентрации растворенного кислорода и биохимической потребности в кислороде в притоке для второго проектного варианта рассчитывались по модели (1) в квазистационарном приближении. При этом использовались следующие величины: расстояние между створом «р. Ангара – г. Усть-Илимск, 10 км ниже сбросов УИЛПК» и створом «с. Кежма» – 169 км, средняя скорость течения Ангара в естественном

состоянии между этими створами нижнего бьефа Усть-Илимской ГЭС – 1 м/с.

Среднемесячные расходы стока Богучанского водохранилища выбирались такими, чтобы соблюдался проектный режим изменения отметки уровня водохранилища. При первом варианте начальный подпорный уровень (НПУ) 208 м БС предполагается поддерживать с августа по январь. Сработка – с февраля по апрель – на 1 м, а наполнение до НПУ – с мая по июль. При втором варианте – отметка НПУ 173 м БС и объем водохранилища 8 км³ в течение года не меняются, поэтому среднемесячные расходы стока и притока водохранилища принимаются одинаковыми.

Ввиду отсутствия проектных данных о среднемесячных температурах в водохранилище при варианте с НПУ 173 м БС для него были рассчитаны два предельных случая вариации температурных условий. В первом из них считалось, что трансформация растворенного кислорода и биохимической потребности в кислороде происходит при тех же температурах, что и при режиме эксплуатации водохранилища с НПУ 208 м БС. Во втором случае считалось, что температура воды в водохранилище при режиме эксплуатации с НПУ 173 м БС изменяется так же, как и в реке, не зарегулированной Богучанским

гидроузлом. В действительности же температура водной массы будет изменяться между соответствующими температурами предельных случаев, как и объем водохранилища, – между объемом реки на рассматриваемом участке и объемом водохранилища с НПУ 208 м БС. Как видно из результатов модельных расчетов для условий 1986 г. (рис. 1–2), выбор того или иного сценария термических условий существенно не меняет характера трансформации растворенного кислорода и биохимической потребности в кислороде в Богучанском водохранилище. Это можно объяснить невысокой интенсивностью микробиологических процессов в водных экосистемах рассматриваемого речного бассейна. Основную роль в самоочищении здесь играют процессы физического удаления загрязнений.

Результаты расчетов динамики РК-БПК в Богучанском водохранилище в гидрологических условиях 1986 г. (см. рис. 1–2) показывают следующую картину. Создание гидроузла по проектному варианту с НПУ 208 м БС, нивелируя влияние высокой антропогенной нагрузки, понизит концентрацию БПК₅ в Ангаре в течение всего года до уровня, соответствующего ПДК (БПК₅ ≈ 0,7 · БПК_{полн.}). Величина предельно допустимой концентрации для БПК_{полн.} = 3 мг/л).

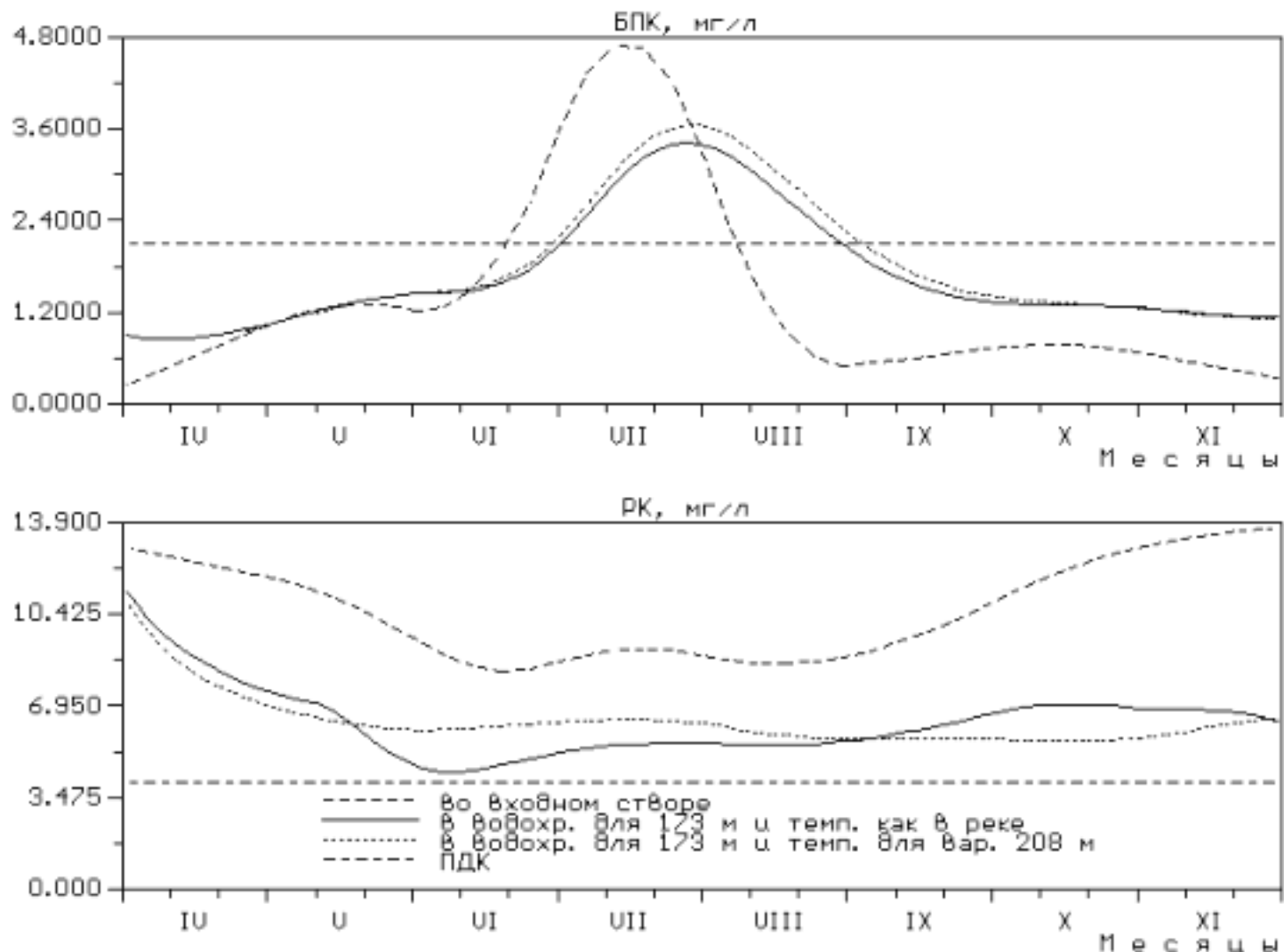


Рис. 1. Прогноз качества воды в Богучанском водохранилище для условий 1986 г. при НПУ = 173 м БС

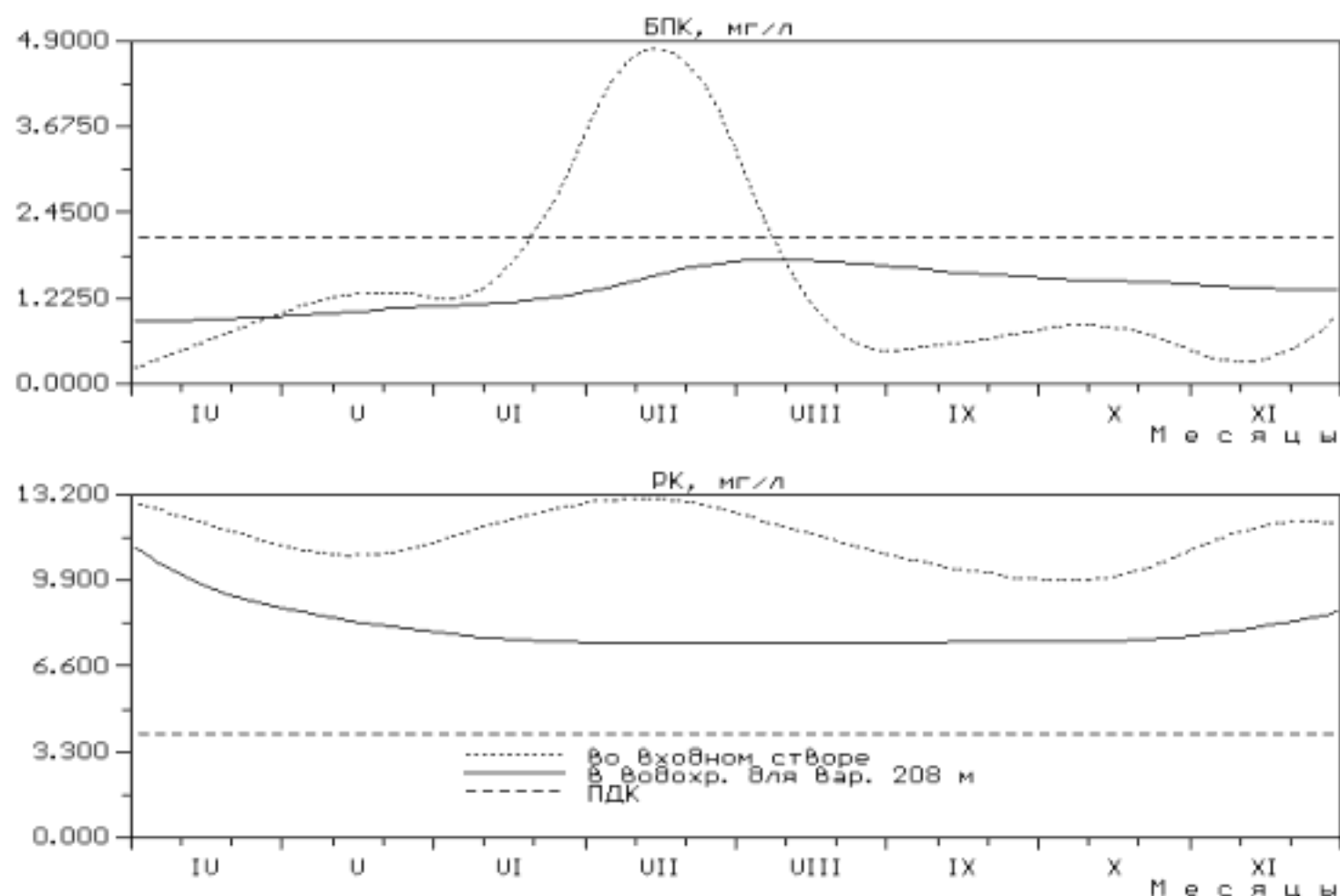


Рис. 2. Прогноз качества воды в Богучанском водохранилище для условий 1986 г. при НПУ = 208 м БС

Реализация проектного варианта с НПУ 173 м БС в целом практически не изменит уровня загрязненности Ангары легкоокисляемой органикой в связи с высокой проточностью воды в водохранилище, немногим отличающейся от условий реки.

Снижение концентрации растворенного кислорода может наблюдаться для обоих проектных вариантов. Но ввиду высокой степени аэрации тем не менее средняя концентрация растворенного кислорода будет в пределах ПДК для водопотребления, т.е. выше 4 мг/л. Есть вероятность возникновения гипоксии в приплотинной части водохранилища в летний период. Для более конкретных выводов на этот счет было бы необходимым проведение специальных расчетов по моделям, более детально воспроизводящим процессы формирования качества природных вод в вертикальном разрезе.

На основании проведенных исследований были сделаны следующие выводы:

1. Способность вод реки Ангары к самоочищению за счет деструкции органических загрязнений

в настоящий момент следует признать незначительной.

2. Создание Богучанского гидроузла приведет к некоторому снижению концентрации растворенного кислорода в поверхностных водах, но не ниже ПДК для водопотребления, для обоих проектных вариантов с НПУ 173 и 208 м БС. Более предпочтительным, с точки зрения качества воды, выглядит проектный вариант с НПУ 208 м БС, при реализации которого произойдет значительное уменьшение концентрации легкоокисляемой органики, вплоть до уровня ПДК в течение всего рассматриваемого периода.

Реализация проектного варианта с НПУ 173 м БС существенного влияния на динамику БПК₅ в водах Ангары не окажет.

3. Для улучшения качества воды в Ангаре нужно в первую очередь предусмотреть меры по снижению поступления загрязнений со сбросами сточных вод и поверхностным смывом.

Библиографический список

1. Цхай А.А., Жоров В.А., Постнова И.С., Рыков Д.А., Кошелев К.Б., Кошелева Е.Д. Информационные технологии водного мониторинга чрезвычайных ситуаций // Водочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2008. – №8.

2. Цхай А.А. Мониторинг и управление качеством вод речного бассейна: модели и информационные системы. – Барнаул, 1995.