
ФАКТЫ, ОЦЕНКИ, ПЕРСПЕКТИВЫ

УДК 338.27

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ КАСКАДА ГЭС ПРИ РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНОВКАХ ВОЗМОЖНЫХ ГИДРОУЗЛОВ

О.П. Бурматова

Институт экономики и организации
промышленного производства СО РАН
E-mail: burmatova@ngs.ru

В статье анализируется роль гидроэнергетического строительства, существующих и возможных будущих водохранилищ в составе гидроузлов на реках Ангара и Енисей в формировании качества воды в результате достигнутого и нового хозяйственного освоения в регионе Среднего Енисея и Нижнего Приангарья. В соответствии с этим основное внимание уделяется выявлению роли потенциальных и существующих водохранилищ Ангаро-Енисейского каскада ГЭС по следующим направлениям: 1) формирование возможного хозяйственного комплекса, в том числе энергоемких отраслей, 2) оценка состояния качества воды в водохранилищах, которое может сложиться под влиянием экономического развития региона. В качестве инструмента исследования предложена модель, описывающая процесс изменения концентраций примесей в зарегулированном водоеме (водохранилище) и в донных отложениях. Выполненные расчеты позволили определить, как меняется качество воды в водохранилищах каскада ГЭС под влиянием сброса промышленных стоков перспективных целлюлозно-бумажных комбинатов в Нижнем Приангарье.

Ключевые слова: взаимодействие водных объектов с региональной экономикой, управление окружающей средой, энергоемкие отрасли промышленности, моделирование отношений водоемов и экономики региона, целлюлозно-бумажное производство, качество воды.

PREDICTION WATER QUALITY IN THE RESERVOIRS CASCADE OF THE HYDROELECTRIC POWER STATIONS IN CONDITION OF DIFFERENT LAYOUT OF THE POSSIBLE HYDROUNITS

O.P. Burmatova

Institute of Economics and Industrial Engineering
of the Siberian Branch of Russian Academy of Sciences
E-mail: burmatova@ngs.ru

The article analyzes the role of hydropower construction, current and possible future water reservoirs as part of the hydroschemes on the rivers Angara and Yenisei in the formation of water quality under the influence of the economic development in the region

of the Middle Yenisei and the Lower Angara. In accordance with this main attention is given on identifying the role of reservoirs with the following items: 1) the formation of a possible economic complex, including energy-intensive industries, 2) assessing the state of the water environment that can arise under the influence of economic development of the region. As a research tool, a model that describes the process of changing the concentrations of impurities in the regulated water body (reservoir) and in the bottom sediments is proposed. The calculations made allowed to determine how is changed water quality in the reservoirs of the cascade of HPS under the influence of discharge of industrial wastewater of the promising pulp and paper mills in the Lower Angara region.

Keywords: interaction of the water reservoirs with the regional economy, environmental management, energy-intensive industries, modeling the relationships of reservoirs and regional economy, pulp and paper production, water quality.

АНГАРО-СРЕДНЕ-ЕНИСЕЙСКИЙ КОМПЛЕКС КАК ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одной из ключевых предпосылок формирования экономики региона в пределах территории среднего течения Енисея и нижнего течения Ангары – Ангаро-Средне-Енисейского комплекса (АСЕК) – является прежде всего наличие обильных и экономически целесообразных для использования гидроэнергетических ресурсов, потенциальные запасы которых оцениваются в 40 млрд кВт·ч. Гидроэнергоресурсы АСЕК в среднесрочной и долгосрочной перспективе являются основой энергетической базы данного региона и фактором, привлекательным для прихода на соответствующую территорию крупномасштабных инвестиций. В соответствии с этим представляет интерес анализ роли гидроэнергостроительства и возможных водохранилищ в составе будущих гидроузлов на реках Ангара и Енисей с точки зрения формирования возможного хозяйственного комплекса на базе энергоемких производств и оценки состояния окружающей среды, которое может сложиться под влиянием хозяйственного освоения данного региона [1–3].

Ангаро-Енисейский каскад ГЭС – самый крупный комплекс гидроэлектростанций в России, включающий 7 действующих и 5 проектируемых ГЭС: соответственно 4 (Иркутская, Братская, Усть-Илимская и Богучанская) и 3 (Нижнебогучанская, Мотыгинская, Стрелковская) – на Ангаре и 3 (Саяно-Шушенская, Майнская, Красноярская) и 2 (Средне-Енисейская и Предивинская ГЭС) – на Енисее)¹ [4, 10, 11]. Несмотря на то, что созданные в регионе водохранилища привели не только к обострению целого ряда существующих проблем, но и вызвали появление новых, решение данных проблем во многом игнорируется или в лучшем случае откладывается на будущее [5, 10, 13]. В то же время планы по дальнейшему гидроэнергетическому освоению Ангары и Енисея продолжают будоражить умы потенциальных покорителей сибирских рек [6, 8, 12]. Поэтому проработка всевозможных последствий создания водохранилищ при сооружении новых ГЭС в составе Ангаро-Енисейского каскада представляется актуальной.

Цель рассматриваемого исследования состоит в выявлении роли гидроэнергетического строительства и возможных водохранилищ в составе

¹ Ангарский каскад ГЭС. Википедия. <https://ru.wikipedia.org/>.



Рис. 1. Схема размещения действующих и проектируемых ГЭС, ЦБК и алюминиевых заводов в Ангаро-Средне-Енисейском регионе ([8 12, 14] и дополнения автора)

будущих гидроузлов на реках Ангара и Енисей в формировании качества водной среды под влиянием хозяйственного освоения региона АСЕК с позиций анализа взаимодействия возможных водохранилищ Средне-Енисейского и Нижнеангарского каскадов ГЭС с хозяйством соответствующего региона и оценки возможного качества воды в водохранилищах каскада в зависимости от вариантов расположения створов гидроузлов и размещения возможных объектов будущего комплекса в зоне водохранилищ (см. рисунок)².

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1) выявить наиболее существенные взаимодействия между гидроузлами и окружающей природной средой для рассматриваемого хозяйственного комплекса в зависимости от его конкретных природно-климатических и экономических особенностей;

2) сравнить различные варианты взаимного расположения гидроузлов и хозяйственных объектов с точки зрения антропогенной нагрузки на водный бассейн;

² При этом мы не предлагаем и не считаем необходимым строительство новых ГЭС на Ангаре и Енисее; интерес в данном случае чисто аналитический – проверить, каковы возможные экологические последствия в случае реализации имеющихся предложений в [6, 8] по освоению гидроэнергетического потенциала Ангары и Енисея.

3) выявить водохранилища и их участки с наиболее напряженной экологической обстановкой и определить степень отклонения загрязненности воды от установленных нормативов;

4) предложить подход к комплексному моделированию взаимосвязей водохранилищ и хозяйства как целостной экономической системы; разработать методику анализа взаимодействия между гидроузлами и окружающей природной средой, включая выбор модели как инструмента исследования, способы представления исходных данных в модели и анализа получаемых результатов;

5) с использованием предложенного модельного аппарата проанализировать возможные последствия создания гидроузлов для природно-хозяйственной среды региона.

В соответствии с поставленными целями и задачами основное внимание акцентируется на выявлении роли гидроэнергостроительства и возможных водохранилищ в составе будущих гидроузлов на реках Ангара и Енисей с позиций, во-первых, формирования возможного хозяйственного комплекса, включающего энерго- и водоемкие производства (прежде всего целлюлозно-бумажные комбинаты) [6] и, во-вторых, оценки состояния окружающей среды, которое может сложиться под влиянием хозяйственного освоения региона АСЕК.

Производства, которые намечается создать в Нижнем Приангарье, характеризуются большими объемами водопотребления и водоотведения, высокой токсичностью стоков, что создает существенную дополнительную экологическую нагрузку на водную среду [2, 4]. Особенно следует отметить, что основная доля в общем объеме стоков будет принадлежать 3-м предполагаемым ЦБК большой мощности (см. рисунок). Крупными загрязнителями в перспективе могут стать также гидролизные, глиноземные, алюминиевые, свинцово-цинковые, нефте-и газохимические и другие производства.

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения поставленных задач предложена математическая модель взаимодействия водохранилища с хозяйством региона, которая отражает:

1) содержание в водохранилище как растворимых, так и нерастворимых веществ (путем вычисления концентраций в воде и на дне мелководья и глубоководья) с учетом перемешивания (из-за турбулентных процессов) поступающих в водоем сточных вод различного качества;

2) процессы седиментации (оседания) и взмучивания примесей из данных отложений;

3) накопление загрязнений с течением времени с учетом процесса естественного саморазложения;

4) различные варианты взаимного расположения створов водохранилищ, составляющих Средне-Енисейский каскад ГЭС;

5) различные варианты размещения намеченных производств (главным образом ЦБК) по промышленным узлам АСЕК и, прежде всего, Нижнего Приангарья;

Модель взаимодействия водохранилища с хозяйством региона

Пусть

$$S_1 = S_{\text{зеркала}} + \frac{V}{S_{\text{зеркала}}} \times L;$$

$$h = V / S_{\text{зеркала}}$$

S_2 и S_3 – площади мелководных и глубоководных участков; V – средняя глубина; L – длина водохранилища

2. Суточный расход воды (тыс. м³/сут), выносящий из водохранилища определенное количество примесей:

$$F = \sum_{k=1}^n C_k q_k + m_{\text{пл}}$$

3. Уравнения баланса массы загрязняющего вещества за промежуток времени Δt :

$$\begin{cases} M_1(t + \Delta t) = M_1(t) + F \Delta t - \frac{Q}{V} M_1(t) \Delta t - \gamma M_1(t) \Delta t - \frac{M_1(t)}{V} S_1 \omega \Delta t + \beta (M_2(t) - M_1(t) - M_2(t - \Delta t)), \\ M_2(t + \Delta t) = M_2(t) + \frac{M_1(t)}{V} S_2 \omega \Delta t - \gamma M_2(t) \Delta t - \beta (M_2(t) - M_1(t) - M_2(t - \Delta t)), \\ M_3(t + \Delta t) = M_3(t) + \frac{M_1(t)}{V} S_3 \omega \Delta t - \gamma M_3(t) \Delta t, \end{cases}$$

4. Разделив параметры условия (3) на Δt и переходя к пределу при $\Delta t \rightarrow 0$, получаем:

$$\begin{cases} \frac{dM_1}{dt} = F - \frac{Q}{V} M_1 - \gamma M_1 - \frac{S_1 \omega}{V} M_1 + \beta \frac{dM_2}{dt}, \\ \frac{dM_2}{dt} = \frac{S_2 \omega}{V} M_1 - \gamma M_2 - \beta \frac{dM_2}{dt}, \\ \frac{dM_3}{dt} = \frac{S_3 \omega}{V} M_1 - \gamma M_3. \end{cases}$$

Освобождаемся от производных в правой части уравнений (4) и переходим к концентрациям.

При этом для жидкой фазы: $C_2 = \frac{M_2}{S_2}$, $C_3 = \frac{M_3}{S_3}$,

для твердой фазы (г/тыс. м³): $C_1 = \frac{M_1}{V}$

5. В результате система (4) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = \frac{F}{V} - \frac{Q}{V} C_1 - \gamma C_1 - \frac{\omega S_1 + \beta S_3}{V(1 + \beta)} C_1 - \frac{\beta S_2}{V(1 + \beta)} \gamma C_2, \\ \frac{dC_2}{dt} = \frac{\omega}{1 + \beta} C_1 - \frac{\gamma}{1 + \beta} C_2, \\ \frac{dC_3}{dt} = \omega C_1 - \gamma C_3. \end{cases}$$

6. Учитывая (1) и (2), систему (5) записываем в виде:

$$\begin{cases} \frac{dC_1}{dt} = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^n C_k q_k + \frac{m_{\text{пл}}}{V} - \gamma C_1 - \frac{1}{V} (q_{\text{пл}} + q_b) C_1 - \frac{\omega (S_1 + \beta S_3)}{V(1 + \beta)} C_1 - \frac{\beta S_2}{V(1 + \beta)} \gamma C_2, \\ \frac{dC_2}{dt} = \frac{\omega}{1 + \beta} C_1 - \frac{\gamma}{1 + \beta} C_2, \\ \frac{dC_3}{dt} = \omega C_1 - \gamma C_3. \end{cases}$$

C_k – концентрация примеси в притоках или стоках, сбрасываемых в водохранилище (г/тыс. м³) в пункте k ; q_k – расходы притоков или объемы стоков (тыс./сут); $m_{\text{пл}}$ – поток примесей, поступающих в процессе пластовой фильтрации из донных отложений (г/сут); $q_{\text{пл}}$ – среднесуточный попуск воды через плотину в сезоне i ; q_b – объем безвозвратного водопотребления

$Q' = q'_{\text{пл}} + q_b$

$M_1(t)$, $M_2(t)$, $M_3(t)$ – масса примесей в воде, а также на дне мелководья и глубоководья, γ – коэффициент саморазложения загрязнителя, ω – скорость седиментации (м/сут), β – параметр, характеризующий отношение количества примеси, взмучиваемой за малый промежуток времени, к количеству примеси, седиментировавшей из воды за предельный промежуток Δt

б) особенности протекания физических процессов разложения загрязнений в водохранилищах.

Модель основана на соотношениях, предложенных в методических рекомендациях по математическому моделированию абиотических процессов качественного изменения воды в водохранилищах [7, 9]³. Важно отметить, что используемая система условий отличается относительной простотой и незагроможденностью, что обеспечивает существование решения в аналитической форме. Отмеченное достоинство сочетается с достаточно широкими возможностями для учета содержания в водохранилище как растворимых, так и нерастворимых веществ путем вычисления концентраций в воде и на дне мелководья и глубоководья; учета процессов седиментации (оседания) и взмучивания примесей из данных отложений; отражения фактора накопления загрязнителей с течением времени с учетом процесса естественного саморазложения.

Модель строится на предположении, что из-за турбулентных процессов в водной среде происходит достаточно быстрое перемешивание поступающих в водоем сточных вод различного качества. При этом учитывался процесс фактической седиментации загрязнителей на дно как следствие двух взаимодействующих факторов: седиментации и взмучивания примеси. Кроме того, принимается, что количество осадившегося вещества пропорционально количеству поступающих в водоем загрязняющих веществ и рассматриваемому промежутку времени.

В то же время процесс взмучивания вещества со дна водных объектов не может быть описан как линейный, так как, во-первых, взмучивание практически не происходит с участков дна, расположенных глубже 8–10 м; во-вторых, количество загрязняющего вещества, поступающего в воду при взмучивании, пропорционально не всей массе, содержащейся в донных отложениях, а лишь некоторой ее части, находящейся в верхнем (активном) слое дна. Поэтому при моделировании специально выделяются глубокие участки, откуда взмучивание не происходит.

Система уравнений (6) описывает процесс изменения концентрации примесей в зарегулированном водоеме (водохранилище) и в донных отложениях.

В качестве основных объектов-загрязнителей рассматриваются промышленность (промышленные стоки), коммунальное (хозяйственно-фекальные стоки) и сельское (смыв удобрений с полей) хозяйство. При этом в промышленности и коммунальном хозяйстве возникают дополнительные затраты, связанные с доведением воды до требуемых стандартов, в сельском хозяйстве возникают потери продукции вследствие снижения урожайности на землях, орошенных загрязненной водой, а также затраты по восстановлению загрязненных земель. Представляет также интерес анализ способов оценки возможных негативных экологических последствий, связанных с использованием вышеназванными реципиентами загрязненной воды. Качество воды в водохранилищах Средне-Енисейского и Нижнеангарского каскадов выступает в данном случае в качестве основного моделируемого показателя.

³ В разработке модели и ее практическом приложении принимала участие Е.Н. Глебова.

Качество воды может быть выражено через показатели концентраций различных вредных веществ. При этом особенностью водохранилищ, в отличие от рек, является процесс накопления вредных веществ в их резервуаре вследствие замедленной циркуляции воды. При этом имеет значение концентрация загрязнений как в воде, так и в придонном слое.

При построении модели принятая за основу система условий [7] была модифицирована в соответствии с требованиями конкретной задачи и расширена с целью учета факторов, ранее не находивших в ней отражения. Соответственно в используемую для расчетов модель были внесены следующие дополнения и модификации по сравнению с предложенными условиями в [7]:

1. Модификация условий баланса примесей в зависимости от водного баланса. В соответствующие условия добавлены требования варьирования данных об объеме: а) по сезонам, что потребовало линейной интерполяции с целью преодоления дискретности изменений (циклические колебания объема по сезонам в период стационарного состояния водохранилища); б) по годам с учетом увеличения объема резервуара.

2. Учет возможности наличия нескольких пунктов сброса сточных вод в одно и то же водохранилище путем разбиения объема водохранилища на несколько вложенных друг в друга «камер». Такие камеры рассматриваются последовательно, с учетом «наложения» сбросов нижерасположенных предприятий на значение концентраций, сформировавшихся в камере большего объема, включающей в себя нижерасположенную камеру. Тем самым учитывается увеличение по мере приближения к приплотинной части водохранилища концентрации вредных веществ, сносимых вниз по течению.

3. Учет как нерастворимых, так и хорошо растворимых и частично растворимых веществ. В предлагаемой модели предусмотрен учет растворения определенной доли вещества, ожидаемого при данной температуре. Исходная система условий (6) строится в предположении, что вся масса сброшенного загрязнителя не является растворимой и в конце концов осядет на дно.

Рассмотрим этапы нахождения решений системы дифференциальных уравнений⁴.

Связь между последовательными решениями в динамике устанавливается следующим образом:

– на основании исходных данных и значений фоновых концентраций на начало расчетного периода времени (суток) находится вид функций изменения концентраций;

– путем экстраполяции подстановки значения длительности периода в найденные функциональные зависимости вычисляются значения концентраций на конец периода;

– значения концентраций на конец предыдущего периода принимаются в качестве фоновых на начало следующего периода.

Затем данная процедура повторяется и т.д.

⁴ Для решения описанной системы дифференциальных уравнений применительно к водохранилищам, составляющим Средне-Енисейский каскад, разным вариантам расположения объектов Нижнего Приангарья, а также различным загрязняющим веществам, содержащимся в стоках объектов, использовалась программа, разработанная Е.Н. Глебовой.

Этапы нахождения решений дифференциальных уравнений

Примем следующие условные преобразования:

$$A = -\left(\frac{Q}{V} + \gamma + \frac{\omega(S_1 + \beta S_2)}{V(1 + \beta)}\right),$$

$$B = -\frac{\gamma\beta S_2}{V(1 + \beta)},$$

$$D = \frac{1}{V} \sum_{k=1}^n C_k q_k + \frac{m_{\text{ин}}}{V},$$

$$E = \frac{\omega}{1 + \beta}, \quad F = -\frac{\gamma}{1 + \beta},$$

$$G = \omega, \quad H = -\gamma,$$

$$C_1 = x, \quad C_2 = y, \quad C_3 = z.$$

Характеристическое уравнение матрицы имеет вид:

$$(H - T)[(A - T)(F - T) - BE] = (H - T)(T^2 - (A + F)T + AF - BE) = 0$$

Корни характеристического уравнения:

$$T_1 = H,$$

Собственные вектора системы:

$$V_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad V_2 = \begin{pmatrix} \frac{T_2 - H}{G} \\ \frac{E(T_2 - H)}{G(T_2 - F)} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad V_3 = \begin{pmatrix} \frac{T_3 - H}{G} \\ \frac{E(T_3 - H)}{G(T_3 - F)} \\ 1 \end{pmatrix}$$

На 2-м этапе ищется частное решение неоднородной системы методом вариации постоянных, с учетом столбца свободных членов. Найденные значения функциональных коэффициентов выражаются следующим образом:

$$C_1(t) = \frac{(H - F)DG}{(T_2 - H)(T_2 - T_1)(-T_1)} \cdot \frac{1}{e^{Ht}} + C'_1,$$

$$C_2(t) = \frac{DG(T_2 - F)}{(T_2 - H)(T_2 - T_3)(-T_2)} \cdot \frac{1}{e^{Ht}} + C'_2,$$

$$C_3(t) = \frac{DG(T_3 - F)}{(T_3 - H)(T_3 - T_2)(-T_3)} \cdot \frac{1}{e^{Ht}} + C'_3,$$

Тогда исходная система имеет следующий вид:

$$\dot{x} = Ax + By + D,$$

$$\dot{y} = Ex + Fy,$$

$$\dot{z} = Gx + Hz.$$

На 1-м этапе ищется общее решение однородной системы (без столбца свободных членов).

Характеристическая матрица однородной системы имеет вид:

$$\begin{vmatrix} (A - T_1) & B & 0 \\ E & (F - T_1) & 0 \\ G & 0 & (H - T_1) \end{vmatrix} = 0$$

$$T_{2,3} = \frac{(A + F) \pm \sqrt{(A + F)^2 - 4(AF - BE)}}{2} = \frac{(A + F) \pm \sqrt{(A - F)^2 + 4BE}}{2}$$

Общее решение системы:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = C_1 \times V_1 \times e^{Ht} + C_2 \times V_2 \times e^{T_2 t} + C_3 \times V_3 \times e^{T_3 t},$$

C_1, C_2, C_3 – произвольные постоянные, e – экспонента.

Так как общее решение неоднородной системы методом вариации постоянных, с учетом столбца свободных членов. Найденные значения функциональных коэффициентов выражаются следующим образом:

Так как общее решение неоднородной системы дифференциальных уравнений равно сумме общего решения однородной системы и частного решения неоднородной системы, то окончательно вектор концентраций загрязнения принимает вид:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = (C_1(t) + C'_1) \times V_1 \times e^{Ht} + (C_2(t) + C'_2) \times V_2 \times e^{T_2 t} + (C_3(t) + C'_3) \times V_3 \times e^{T_3 t}$$

ФОРМИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОДЫ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ КОМПОНОВКИ КАСКАДОВ ГЭС

В ходе исследования были рассмотрены три варианта компоновки Средне-Енисейского и Нижнеангарского каскадов ГЭС (см. рисунок) [6, 8]. В зависимости от отметки НПУ Средне-Енисейской ГЭС в состав гидроэнергетического комплекса входят один-два гидроузла на р. Енисей и один гидроузел на р. Ангара. Район непосредственного влияния Средне-Енисейской ГЭС охватывает территорию среднего течения р. Енисей (от Б. Мурты до Б. Пита) и нижнего течения р. Ангара – от ее устья до створа Богучанской ГЭС.

Основные характеристики ГЭС и соответствующих им водохранилищ на Среднем Енисее и в нижнем течении Ангара по вариантам НПУ приведены в табл. 1 [8].

Сооружение Средне-Енисейской ГЭС рассматривается по двум вариантам (см. табл. 1):

1) использование объединенного стока рек Ангара и Енисея со Средне-Енисейской ГЭС в Абалаковском створе при НПУ 103 и 127 м (табл. 1, вариант I);

2) использование отдельного стока рек Ангара и Енисея со Средне-Енисейской ГЭС в Савинском створе при НПУ 127 и Стрелковской ГЭС в Плехановском створе на р. Ангаре с НПУ 140 м (табл. 1, вариант II).

Анализ полученных результатов расчетов осуществлялся по трем основным направлениям:

1) сравнение различных вариантов компоновки каскадов ГЭС с точки зрения возможного формирования загрязнения воды;

2) оценка влияния целлюлозно-бумажного производства на качество воды в водохранилищах;

3) выявление зависимости изменения концентрации вредных веществ в воде рек Ангара и Енисей под влиянием создания и функционирования производственных объектов (при этом особо выделяются сезонное регулирование водохранилищ и период их наполнения).

Сравнение трех различных вариантов компоновки гидроузлов Средне-Енисейского и Нижнеангарского каскадов ГЭС с точки зрения загрязненности воды осуществлялось по пяти вредным веществам (нефтепродукты, фенолы, фурфурол, диметилдисульфат, метилмеркаптан), содержащимися в стоках трех ЦБК, размещаемых соответственно в Богучанском, Мотыгинском и Абалаковском промузлах (при фиксированном расположении ЦБК по промузлам⁵).

Результаты сравнения позволили выявить водохранилища с наиболее напряженной ситуацией по загрязнению воды (см. рисунок, табл. 2, 3). Такими оказались водохранилище Нижнебогучанской ГЭС при расположе-

⁵ Варианты размещения ЦБК в Нижнем Приангарье были определены в результате решения ряда оптимизационных задач на материалах Нижнего Приангарья, результаты которых изложены, в частности, в публикациях [1–3]. В данной задаче не рассматривается вариант возможного размещения ЦБК в Лесосибирском промузле, т.к. его стоки не попадают ни в одно из водохранилищ каскада. При расположении ЦБК в Кудинском промышленном узле стоки ЦБК попадают в водохранилище Богучанской ГЭС. Водоохранилища Енисейского каскада становятся приемниками стоков ЦБК при расположении ЦБК в Богучанском, Мотыгинском и Абалаковском узлах.

Таблица 1

**Основные водноэнергетические характеристики ГЭС и их водохранилищ
на Среднем Енисее и Нижней Ангаре по вариантам НПУ**

ГЭС и их расположение	Мощность, МВт	НПУ, м	Зеркало водохранилища, тыс. га	Площадь загопления земель, тыс. га	Объем (км ³)		Глубина сработки, м	Уровень мертвого объема, м	Длина водохранилища, км
					полный	полезный			
Вариант I-103*									
1. Средне-Енисейская ГЭС в Абалаковском створе на р. Енисей (в 21 км ниже устья р. Ангары)	3600	103	138,3	86,3	13,8	2,7	2,7	1,4	100,8
2. Мотыгинская ГЭС в створе «Выдумский Бык» на р. Ангаре (в 159 км выше устья р. Ангары)	1145	140	79,3	30,5	12,0	0,4	0,4	1,0	139,5
3. Предивинская ГЭС на р. Енисей (выше устья Ангары на 157 км и ниже Красноярска в 177 км)	1180	127	63,3	51,2	6,4	0,2	0,5	126,5	92,5
Вариант I-127									
4. Средне-Енисейская ГЭС в Абалаковском створе на р. Енисей (в 21 км ниже устья р. Ангары)	6000	4	386,6	272,0	73,4	2,7	0,8	126,2	525
5. Нижнебогучанская ГЭС в створе «Шивера Косая» (в 338 км от устья р. Ангары и в 16 км выше п. Богучаны)	660	140	24,3	6,5	1,4	0,1	0,5	139,5	87,5
Вариант II-127-140									
6. Средне-Енисейская ГЭС в Савинском створе на р. Енисей (в 22 км выше устья р. Ангары)	2500	127	152,3	130,2	26,5	0,8	0,5	126,5	205
7. Стрелковская ГЭС в Плехановском створе на р. Ангаре (в 54 км от устья р. Ангары)	920	140	267,4	188,9	55,7	2,7	1,0	139,0	340

* Предивинская ГЭС и ее водохранилище, входящие в состав данного варианта, были исключены из расчетов, так как сточные воды ни одного из рассматриваемых ЦБК не попадают в соответствующее водохранилище.

нии в створе «Шивера Косая», а также водохранилище Средне-Енисейской ГЭС в Абалаковском створе при НПУ 103 м.

Для выявления степени загрязненности воды в водохранилищах при сооружении каскадов ГЭС все рассматриваемые водохранилища были проанжированы на основе общей картины загрязненности всеми рассматриваемыми пятью вредными веществами. При этом меньший номер ранга соответствует большей загрязненности (см. табл. 3).

Таблица 2

Привязка сбросов сточных вод ЦБК к водохранилищам

ЦБК	Производственная мощность, тыс. т/год	Промышленные узлы	ГЭС и их водохранилища
ЦБК-1	580	Богучанский	5. Нижнебогучанская ГЭС 2. Мотыгинская ГЭС 7. Стрелковская
ЦБК-2	1200	Мотыгинский	7. Стрелковская ГЭС 1. Средне-Енисейская ГЭС в Абалаковском створе при НПУ-103 4. Средне-Енисейская ГЭС в Абалаковском створе при НПУ-127
ЦБК-3	750	Абалаковский	1. Средне-Енисейская ГЭС в Абалаковском створе при НПУ-103 4. Средне-Енисейская ГЭС в Абалаковском створе при НПУ-127 6. Средне-Енисейская ГЭС в Савинском створе

Таблица 3

Ранги водохранилищ по степени загрязненности сбрасываемыми со сточными водами вредными веществами

Вещества	№ каскада ГЭС					
	I-103-140		I-127		II-127-140	
	1. Средне-Енисейская в Абалаковском створе	2. Мотыгинская	3. Средне-Енисейская в Абалаковском створе	4. Нижнебогучанская	5. Средне-Енисейская в Савинском створе	6. Стрелковская
1. Нефтепродукты	I	IV	V	III-II	VI	II-III
2. Фенолы	II	III	V	I	VI	IV
3. Фурфурол	II	III	V	I	VI	IV
4. Диметилдисульфат	II	III	V	I	VI	IV
5. Метилмеркаптан	II	III-IV	V	I	VI	III-IV
Общий ранг по загрязненности:						
водохранилища	II	III	V	I	VI	IV
каскада	I		II		III	

Каскадам из двух водохранилищ ранг присваивался на основе сопоставления гипотетических среднеарифметических концентраций для пар водохранилищ по пяти вредным веществам:

$$\bar{C}_{\text{каскада}(m_1, m_2)}^n = \frac{C^{m_1} \cdot V^{m_1} + C^{m_2} \cdot V^{m_2}}{V^{m_1} + V^{m_2}},$$

где n – индекс загрязнения; m_1, m_2 – индексы водохранилищ в каскаде; V^m – среднегодовой объем водохранилища m , км³; C^{nm} – среднегодовая концентрация (или максимальная), г/тыс. м³.

Например, по фурфуролу ($n = 3$) средневзвешенные концентрации в воде по каскадам будут следующие:

$$\bar{C}_{(1,2)}^3 = \frac{0,087 \cdot 12,5 + 0,045 \cdot 11,8}{12,5 + 11,8} \approx 0,0666 \text{ г / тыс. м}^3,$$

$$\bar{C}_{(3,4)}^3 = \frac{0,025 \cdot 72,1 + 0,16 \cdot 1,35}{72,1 + 1,35} \approx 0,029 \text{ г / тыс. м}^3,$$

$$\bar{C}_{(5,6)}^3 = \frac{0,02 \cdot 26,1 + 0,03 \cdot 54,4}{80,5} \approx 0,026 \text{ г / тыс. м}^3,$$

$$\bar{C}_{(1,2)}^3 > \bar{C}_{(3,4)}^3 > \bar{C}_{(5,6)}^3.$$

Таким образом, по фурфуролу вариант I-103 (водохранилища 1 и 2) получает наивысший ранг загрязненности, вариант I-127 (водохранилища 4 и 5) – средний ранг, вариант II-127-140 (водохранилища 6 и 7) – низший ранг (см. табл. 1). И так далее по всем веществам.

Ранжирование вариантов каскадов с точки зрения общей обстановки по обоим водохранилищам, составляющим каскад, свидетельствует о том, что наиболее неблагоприятным в этом отношении является вариант I-103, наименее загрязненными оказываются водохранилища по варианту II-127-140 (см. табл. 3).

ВЫВОДЫ

В целом проведенное исследование позволило решить следующие задачи:

1) предложен подход к комплексному моделированию взаимосвязей водохранилищ и хозяйства как целостной экономической системы;

2) разработана методика анализа взаимодействия между гидроузлами и окружающей природной средой, включая разработку модели как инструмента исследования, выбор способов представления исходных данных в модели и анализа полученных результатов;

3) выполнен сравнительный анализ различных вариантов компоновки каскадов ГЭС на реках Енисей и Ангара с точки зрения возможного формирования загрязнения воды и проанализировано возможное влияние ЦБК на качество воды в водохранилищах, а также показано, как будет меняться концентрация вредных веществ в динамике в зависимости от сезонного регулирования водохранилищ и периода их наполнения;

4) реализация предложенного подхода и модельного аппарата на материалах конкретного региона позволила оценить возможные последствия создания гидроузлов для водной среды региона.

Прикладные исследования с использованием разработанной модели позволили сформулировать предложения относительно возможных способов ее совершенствования и высказать рекомендации о возможных путях использования полученных результатов расчетов.

Развитие данной модели целесообразно проводить, на наш взгляд, прежде всего в направлении более полного учета влияющих на качество воды факторов посредством расширения их числа, а также попытаться исключить ряд упрощений, принятых в модели по рассматриваемым факторам.

Представляется, что включение в модель новых факторов возможно по следующим направлениям.

1. Учет стратификации водной толщины по глубине – разных скоростей течения и разных температурных режимов эпилимниона (верхний 15-метровый слой), металимниона (среднего слоя), гиполимниона (нижнего, наименее прогретого слоя с относительно постоянной температурой воды в течение всего года). Учет различий в температурных режимах прежде всего должен проявляться в дифференциации значений скоростей саморазложения: в эпилимнионе они будут существенно изменяться по сезонам, в гиполимнионе – будут примерно на одном низком уровне в течение всего года.

2. Учет фонового загрязнения воды и каскадности расположения водохранилищ: загрязненная вода вышележащего водохранилища поступает в водохранилище, расположенное ниже по течению, влияя на качество воды в нем.

Тогда в выражении общего потока примесей F^{m+1} , поступающих в водохранилище $m + 1$, появится еще одно слагаемое:

$$C_1^{\text{фон.}nm}(t-1) \cdot (V^{m+1}(t) - V^{m+1}(t-1) + Q^{m+1}(t)),$$

где $C_1^{\text{фон.}nm}$ – концентрация загрязнения вида n в воде вышележащего водохранилища m в период $(t-1)$; $(V^{m+1}(t) - V^{m+1}(t-1) + Q^{m+1}(t))$ – приток воды в периоде t в нижележащее водохранилище $(m+1)$, вычисляемый как алгебраическая сумма ухода воды $Q^{m+1}(t)$ из этого водохранилища в периоде t и изменения объема водохранилища в периоде t по сравнению с $(t-1)$: $\Delta V^{m+1}(t) = V^{m+1}(t) - V^{m+1}(t-1)$, которое может быть как положительным (увеличение объема), так и отрицательным (уменьшение объема). Соответственно приток в первом случае больше, а во втором – меньше расхода воды.

3. Учет диффузии примесей в воду из подстилающих слоев. Этот процесс в первую очередь следует учитывать для нижнего течения Ангары, где под руслом расположено Горевское свинцово-цинковое месторождение.

В методических рекомендациях [7] предлагается математическая модель диффузии примесей (объем примесей, диффундирующих в воду из донных слоев за промежуток времени t). Результат ее независимого решения мог бы быть использован в качестве исходного параметра при вычислении общего потока F поступающих в водохранилище примесей.

4. Учет осаждения примесей из воздуха на зеркало водохранилища. С этой целью возможно использование модели рассеивания вредных веществ в атмосфере, построения карты рассеивания на местности и оценки объема примесей, оседающих на зеркало.

Для Нижнего Приангарья фактор осаждения примесей из воздуха будет играть существенную роль в формировании качества воды водохранилищ ввиду большой мощности предполагаемых к размещению промышленных объектов, высокой токсичности атмосферных выбросов, а также ввиду учащения в случае создания водохранилищ туманных дней, усугубляющих вредное влияние атмосферных загрязнений.

Относительно факторов, нашедших отражение в используемой модели, можно предложить следующие усложнения ряда условий для более адекватного учета их влияния.

1. Площадь мелководья S_2 , условно принятую независимой от времени, следует сделать переменной во времени, с учетом изменения крутизны уклона берегов водохранилища, а также с учетом перехода участков дна из категории глубоководных, где взмучивание со дна в воду минимально или отсутствует вообще, в категорию мелководных, где учитывается процесс взмучивания, и обратного перехода при сезонных колебаниях уровня водохранилища.

2. Требуется «сгладить» характер зависимости параметра γ – коэффициента скорости саморазложения от времени, поскольку в описываемой модели каждому сезону поставлены в соответствие дискретные значения параметра γ .

Полученные результаты, касающиеся изменения качества воды водохранилищ рассмотренных каскадов под влиянием сброса промышленных стоков перспективных целлюлозно-бумажных комбинатов в Нижнем Приангарье, могут быть полезны для характеристики ситуации (загрязнением воды), складывающейся по результатам расчетов с точки зрения сопоставления расчетных значений концентраций с принятыми нормативными уровнями: с ПДК для водоемов хозяйственно-питьевого назначения, с ПДК для водоемов рыбохозяйственного назначения, с требованиями, предъявленными к используемой воде промышленными объектами тех или иных отраслей; оценки дополнительных экономических затрат и потерь, возникающих у различных реципиентов в связи с использованием загрязненной воды.

Литература

1. Бурматова О.П. Влияние хозяйственной деятельности на состояние водного бассейна: моделирование и анализ результатов // Вестник НГУЭУ. 2014. № 2. С. 213–232.
2. Бурматова О.П. Модель выбора варианта хозяйственных решений в регионе с учетом их экологических последствий // Проблемы инновационного управления экономикой регионов Сибири / под ред. А.С. Новоселова, В.Е. Селиверстова. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2015. С. 270–282.
3. Бурматова О.П. Реализация инвестиционных проектов в регионе с позиций экологического императива (на примере Нижнего Приангарья) // Проблемы управления социально-экономическим развитием регионов Сибири / под ред. А.С. Новоселова. Новосибирск: ИЭОПП СО РАН, 2013. С. 269–284.
4. Вендров С.Л. Запросы народного хозяйства к изучению и эксплуатации водохранилищ в связи с задачами комплексного использования и охраны водных ресурсов // Материалы науч.-техн. совещ. по изучению Куйбышевского водохранилища. Куйбышев, 1963. Вып. 1. С. 36–48.
5. Гайденок Н.Д., Чмаркова Г.М., Шапхаев С.Г. Изменение гидрологических свойств Ангары и Енисея в результате возведения каскада ГЭС // Глобальные и региональные проблемы устойчивого развития мира: Материалы международной конференции ЮНЕСКО. Улан-Удэ, 2010. 391 с.
6. Генеральная схема развития объектов электроэнергетики до 2020 года. М.: Гидропроект, 2008. 260 с. (одобренная распоряжением Правительства РФ от 22.02.2008 № 215-р).

7. Математическое моделирование абиотических процессов качественного изменения воды в водохранилищах: Метод. рекомендации / АН УССР. Ин-т гидробиологии; сост. В.И. Лаврик, А.Д. Андреев, А.Н. Билык, Н.А. Никифорович; отв. ред. В.И. Лаврик. Киев: Наукова думка, 1986. 28 с.
8. Средне-Енисейская ГЭС на реке Енисей, ТЭО, I этап: выбор схемы использования участков рек Ангары в нижнем течении и Енисей в среднем течении. Сводная записка. М., 1979. 276 с.
9. Лаврик В.И., Боголюбов В.Н. Управление качеством поверхностного стока с помощью математического моделирования процессов самоочищения // Гидробиологический журнал. 2006. Т. 42. № 1.
10. Бабкин В.И. О регулировании стока на Енисее и его притоках. URL: <http://www.plotina.net/regulirovanie-stoka-na-enisee/>.
11. Вендров С.Л. Каскад: реальность и проекты. URL: <http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/5001/>.
12. ГЭС на Нижней Ангаре. URL: <http://blog.rushydro.ru/?p=8081>.
13. Корытный Л.М. ГЭС Восточной Сибири и их водохранилища. URL: <http://moi-goda.ru/leonid-koritny/echo-ekologo-ekonomicheskikh-skandalov--glava-5-ges-vostochnoy-sibiri-i-ich-vodochranilisha>.
14. <http://snip1.ru/newconstruction/bokuchinskaya-ges-zavershenie-stroitelstva/> – Бору-чанская ГЭС – завершение строительства.

Bibliography

1. Burmatova O.P. Vlijanie hozjajstvennoj dejatel'nosti na sostojanie vodnogo bassejna: modelirovanie i analiz rezul'tatov // Vestnik NGUJeU. 2014. № 2. P. 213–232.
2. Burmatova O.P. Model' vybora varianta hozjajstvennyh reshenij v regione s uchedom ih jekologicheskikh posledstvij // Problemy innovacionnogo upravlenija jekonomikoj regionov Sibiri / pod red. A.S. Novoselova, V.E. Seliverstova. Novosibirsk: IJeOPP SO RAN, 2015. P. 270–282.
3. Burmatova O.P. Realizacija investicionnyh proektov v regione s pozicij jekologicheskogo imperativa (na primere Nizhnego Priangar'ja) // Problemy upravlenija social'nojekonomicheskim razvitiem regionov Sibiri / pod red. A.S. Novoselova. Novosibirsk: IJeOPP SO RAN, 2013. P. 269–284.
4. Vendrov S.L. Zaprosy narodnogo hozjajstva k izucheniju i jekspluatacii vodohranilishh v svjazi s zadachami kompleksnogo ispol'zovanija i ohrany vodnyh resursov // Materialy nauch.-tehn. soveshh. po izucheniju Kujbyshevskogo vodohranilishha. Kujbyshev, 1963. Vyp. 1. P. 36–48.
5. Gajdenok N.D., Chmarkova G.M., Shaphaev S.G. Izmenenie gidrologicheskikh svojstv Angary i Eniseja v rezul'tate vozvedenija kaskada GJeS // Global'nye i regional'nye problemy ustojchivogo razvitija mira: Materialy mezhdunarodnoj konferencii JuNESKO. Ulan-Udje, 2010. 391 p.
6. General'naja shema razvitija ob#ektov jelektrojenergetiki do 2020 goda. M.: Gidroproekt, 2008. 260 p. (odobrennaja rasporyazheniem Pravitel'stva RF ot 22.02.2008 № 215-r).
7. Matematicheskoe modelirovanie abioticheskikh processov kachestvennogo izmenenija vody v vodohranilishhah: Metod. rekomendacii / AN USSR. In-t gidrobiologii; sost. V.I. Lavrik, A.D. Andreev, A.N. Bilyk, N.A. Nikiforovich; отв. ред. V.I. Lavrik. Kiev: Naukova dumka, 1986. 28 p.
8. Sredne-Enissejskaja GJeS na reke Enisej, TJeO, I jetap: vybor shemy ispol'zovanija uchastkov rek Angary v nizhnem techenii i Enisej v srednem techenii. Svodnaja zapiska. M., 1979. 276 p.
9. Lavrik V.I., Bogoljubov V.N. Upravlenie kachestvom poverhnostnogo stoka s pomoshh'ju matematicheskogo modelirovanija processov samoochishhenija // Gidrobiologicheskij zhurnal. 2006. T. 42. № 1.

10. *Babkin V.I.* O regulirovanii stoka na Enisee i ego pritokah. URL: <http://www.plotina.net/regulirovanie-stoka-na-enisee/>.
11. *Vendrov S.L.* Kaskad: real'nost' i proekty. URL: <http://www.vokrugsveta.ru/vs/article/5001/>.
12. GJeS na Nizhnej Angare. UL: <http://blog.rushydro.ru/?p=8081>.
13. *Korytnyj L.M.* GJeS Vostochnoj Sibiri i ih vodohranilishha. URL: <http://moi-goda.ru/leonid-koritnij/echo-ekologo-ekonomicheskich-skandalov--glava-5-ges-vostochnoy-sibiri-i-ich-vodochranilisha>.
14. <http://snip1.ru/newconstruction/bokuchinskaya-ges-zavershenie-stroitelstva/> – Boguchanskaja GJeS – zavershenie stroitel'stva.