

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭВТРОФИРОВАНИЯ В НИЖНЕМ БЬЕФЕ ВОДОХРАНИЛИЩА-ОХЛАДИТЕЛЯ\*†

В. М. БЕЛОЛИПЕЦКИЙ

*Вычислительный центр СО РАН, Красноярск, Россия*

В. Б. ТУГОВИКОВ

*Красноярский государственный технический университет, Россия*

А. А. ЦХАЙ

*Алтайский государственный технический университет*

*Барнаул, Россия*

Рассматривается задача моделирования процессов эвтрофирования и гидротермики в нижнем бьефе водохранилища-охладителя. Приводятся математические модели, численные алгоритмы и результаты численных экспериментов для проектируемой Березовской ГРЭС-II.

## 1. Введение

Температурный режим водохранилищ-охладителей, создаваемых при тепловых электростанциях, существенно отличается от естественного. Высокая температура воды вызывает изменение биохимических параметров водоема. В воде повышается концентрация фито- и биопланктона, изменяется содержание кислорода, затем наступает стадия массовой гибели живых организмов, в результате чего образуются продукты их жизнедеятельности — биогены. Совокупность данных процессов, называемая эвтрофированием, в условиях гидротермического режима водохранилищ-охладителей приводит к существенному загрязнению водоемов. В незамкнутых циклах охлаждения и очистки загрязненная в результате нарушения естественного функционирования водной экосистемы вода сбрасывается в реки или озера, на берегах которых располагаются населенные пункты. Для более эффективного решения задач технического и хозяйственно-питьевого водоснабжения необходимо иметь возможность тщательной проработки различных вариантов экологической защиты уже на стадии проектирования.

Наиболее эффективно эта проблема решается с применением технологии вычислительного эксперимента [1, 2]. В настоящей работе рассматриваются следующие стадии матема-

---

\*© В. М. Белоліпецкий, В. Б. Туговиков, А. А. Цхай, 1997.

†Работа выполнена при финансовой поддержке Красноярского краевого фонда науки, грант № 6F0111.

тической технологии: математическое моделирование, численные алгоритмы, программная реализация и ряд численных экспериментов, проведенных для проектируемой Березовской ГРЭС-II.

## 2. Моделирование гидравлических характеристик потока

В большинстве прикладных гидравлических задач при исследовании неустановившихся течений в открытых водотоках ограничиваются одномерной постановкой. Математические модели основаны на уравнениях Сен-Венана [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{\omega} \right) &= g\omega \left( \frac{\partial z}{\partial x} - \frac{Q|Q|}{\omega^2 C^2 R} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x$ ,  $t$  — пространственная вдоль потока и временная координаты,  $z$  — координата свободной поверхности,  $g$  — ускорение свободного падения,  $Q$  — расход,  $\omega$  — площадь поперечного сечения,  $R$  — гидравлический радиус:  $R = \omega/\chi$ , здесь  $\omega = \int_0^h b(x, \xi) d\xi$ ,  $\chi = b(x, 0) + 2 \int_0^h \sqrt{1 + 0.5(\partial b/\partial \xi)^2} d\xi$ , где  $\chi$  — смоченный периметр,  $b(x, \xi)$  — ширина реки на расстоянии  $\xi$  от дна,  $h$  — глубина реки,  $C$  — коэффициент Шези — вычисляется по формуле Маннинга:  $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$ , где  $n$  — шероховатость русла.

В общем случае шероховатость русла меняется в зависимости от ширины потока и времени года в периоды открытого русла.

Если изменением  $Q$  и  $z$  во времени можно пренебречь, то из (1) получим уравнения для установившегося течения в неравномерных руслах:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q}{\partial x} &= q, \\ (1 - \text{Fr}) \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{2u}{g\omega} \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} &= \left( I_0 + \frac{1}{B} \cdot \frac{\partial \omega}{\partial x_h} \right) \text{Fr} - \frac{Q|Q|}{K^2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $q$  — боковая приточность внутри участков,  $u = \frac{Q}{\omega}$  — средняя скорость течения,

$\text{Fr} = \frac{u^2 B}{g\omega}$  — число Фруда,  $u$  — средняя по сечению горизонтальная скорость потока,

$\frac{\partial \omega}{\partial x_h} = \frac{\partial \omega}{\partial x} \Big|_{h=\text{const}}$ ,  $B$  — ширина свободной поверхности потока,  $K^2 = \omega^2 C^2 R$ . При решении уравнений Сен-Венана для докритических течений ( $\text{Fr} < 1$ ) в области  $x_H < x < x_L$ ,  $t > 0$  задают по одному граничному условию на левой ( $x = x_H$ ) и правой ( $x = x_L$ ) границах:

$$Q|_{x=x_H} = f(t), \quad (3)$$

$$h|_{x=x_L} = h(Q). \quad (4)$$

Для нижних бьефов гидроузлов  $f(t)$  задается таблично и соответствует проектному или реальному режиму пусков. Функция  $h(Q)$  в наблюдаемых створах задается по опорному графику расходов.

### 3. Моделирование температурного режима нижнего бьефа

Температурный режим нижнего бьефа определяется из упрощенного уравнения переноса для температуры [1]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{S_n + S_{\text{дн}} + \hat{S}_v B}{c\rho} + \frac{q}{\omega} (T_q - T), \quad (5)$$

где  $x$  — пространственная координата, направленная вдоль потока,  $t$  — время,  $T$  — температура воды,  $T_q$  — температура путевого притока,  $c$  — удельная теплоемкость,  $\rho$  — плотность воды,  $S_n$  — суммарный тепловой поток через свободную водную поверхность,  $u$  — средняя по сечению скорость течения,  $\hat{S}_v = S_v \omega / B$ ,  $S_v$  — объемные источники тепла, к которым относится поток, обусловленный переходом части механической энергии в тепловую,  $S_{\text{дн}}$  — приток тепла от русла.

Для уравнения (5) необходимо задать начальное и граничное условия:

$$T|_{t=t_0} = T^0(x) \quad \text{при} \quad x_0 \leq x \leq x_L, \quad (6)$$

$$T|_{x=x_0} = \psi(t). \quad (7)$$

Одним из основных факторов, влияющих на изменение термического режима, является суммарный тепловой поток. Составными частями в  $S_n$  входят: тепловой поток, обусловленный поглощением солнечной радиации  $S_r$ ; поглощение длинноволнового излучения атмосферы  $S_a$ ; встречное излучение водной поверхности  $S_w$ ; теплообмен с атмосферой за счет конвекции  $S_p$ ; теплообмен за счет испарения и конденсации  $S_{is}$ . С учетом направления передачи тепла имеем [3]:

$$S_n = S_r + S_a - S_w \pm S_p \pm S_{is}. \quad (8)$$

Для расчета поглощенной солнечной радиации используется следующая зависимость [1, 3]:

$$S_r = 0.94 S_R (1 - 0.65 N^2), \quad (9)$$

где  $N$  — общая облачность, доли единицы,  $S_R$  — солнечная радиация при ясном небе, рассчитываемая по формуле [4]:

$$S_R = \left( 0.66 + 0.34 \frac{\gamma - 0.9 + 0.4 \sin h_c}{0.1 + 0.4 \sin h_c} \right) \frac{\kappa \sin^2 h_c}{\rho^2 (\sin h_c + 0.107)}. \quad (10)$$

Здесь  $\kappa$  — функция от  $\psi_a$ ,  $\psi_a = (1.55 + 0.046c)e^{1.075}$  — влагосодержание атмосферы.  $\gamma$  — склонение солнца, вычисляется по формуле [5]:

$$\gamma = 23.5 \sin \left( \frac{2\pi}{365} (t - d) \right),$$

где  $t$  — номер дня, для которого проводится расчет, отсчитывается от некоторого дня с номером  $d$  ( $d$  отсчитывается от начала года).

$$S_a = 4.46 \cdot 10^{-13} (T_a + 273.15)^6 (1 + 0.17 N^2),$$

$$S_w = 4.47 \cdot 10^{-8} (T + 273.15)^4,$$

$$S_p = 0.459f(w)(T - T_a),$$

$$S_{is} = f(w)(e_s - e_a),$$

где  $e_s = 25.4 \exp\left(17.62 - \frac{5278}{T + 273.15}\right)$  — давление водяного пара на высоте 2 м,  $e_a = 25.4 \exp\left(17.62 - \frac{5278}{T_d + 273.15}\right)$  — давление водяного пара на уровне водной поверхности,  $T_d = \frac{(T_a + 273.15)5278}{5278 - \ln\psi(T_a + 273.15)} - 237.15$  — температура конденсации (точка росы), °C,  $\psi$  — относительная влажность воздуха, %,  $w$  — скорость ветра на высоте 2 м, м/с,  $f(w)$  ккал/(м<sup>2</sup>·ч·мм рт. ст.) — функция скорости ветра. Тепловые потоки, полученные по этим формулам, измеряются в ккал/(м<sup>2</sup>·ч). При неустойчивой температурной стратификации, когда температура воды существенно выше температуры воздуха, трение воздуха о водную поверхность сильнее, чем при устойчивой стратификации, что приводит к изменению теплоотдачи. Такая ситуация наблюдается зимой в нижних бьефах гидроузлов. В связи с этим используются две формулы для расчета функции скорости ветра:

$$f(w) = \begin{cases} 4.3w, & \text{если } \Delta\Theta_v < 0.0148w^3 \text{ ("не подогретая"} \\ & \text{поверхность)}, \\ 3.54w + 3.09(\Delta\Theta_v)^{\frac{1}{3}}, & \text{если } \Delta\Theta_v \geq 0.0148w^3, \end{cases}$$

где  $\Delta\Theta_v = \frac{T + 273.15}{1 - 0.378 e_s/P} - \frac{T_a + 273.15}{1 - 0.378 e_a/P}$  ( $P$  — давление, мм рт. ст.).

## 4. Моделирование процессов эвтрофирования нижнего бьефа

Для прогнозирования хода процессов эвтрофирования в исследуемом объекте применяется метод имитационного моделирования [6]. При этом динамика содержания планктонного звена водной экосистемы оценивается путем описания достаточно полного цикла биохимической трансформации соединений фосфора (P), как правило, лимитирующего развитие гидробионтов. Моделируется изменение под влиянием комплекса природных и антропогенных факторов концентраций компонентов экосистемы в единичном объеме воды, перемещающемся с русловым потоком.

Модель рассматривает взаимодействие в водной толще растворенных минерального (DIP) и органического (DOP) соединений фосфора, его фракций в составе детрита (PD), биомасс фитопланктона (FP) и бактерий (BP). В целом имитационная модель учитывает те фракции фосфора и процессы, которые имеют первостепенное значение в динамике экосистемы, в развитии фитопланктона и при эвтрофировании водных объектов, а именно — продукцию фитопланктона и потребление водорослями DIP, бактериальную продукцию и минерализацию DOP, метаболические выделения фитопланктона и бактерий, их отмирание с образованием детрита и его последующим разложением, а также обменные процессы биогенным веществом в слое вода — дно.

Уравнения биохимической трансформации соединений фосфора в водной толще имеют вид [11, 12]:

$$\frac{\partial \omega C^{(i)}}{\partial t} + \frac{\partial \omega u C^{(i)}}{\partial x} = R^{(i)}\omega + J^{(i)}B + G^{(i)}, \quad (11)$$

где  $C^{(i)}$  — содержание компонентов водной экосистемы, гР/м<sup>3</sup>,  $i = 1$  для биомассы бактерий,  $i = 2$  для биомассы фитопланктона,  $i = 3$  для растворенного органического фосфора,  $i = 4$  для растворенного минерального фосфора,  $i = 5$  для взвешенного детритного фосфора;  $R^{(i)}$  — скорость трансформации каждой фракции фосфора, гР/(м<sup>3</sup>·сут);  $J^{(i)}$  — поток минерального фосфора в водную толщу из донных отложений, гР/(м<sup>2</sup>·сут);  $G^{(i)}$  — скорость поступления компонентов с боковой нагрузкой внутри участков, связанной со смывом и сбросами, гР/(м·сут).

Начальные и граничные условия для уравнения (11) задаются в виде (6), (7).

Скорости изменения концентраций каждой фракции фосфора  $R^{(i)}$  заданы следующими выражениями:

$$\begin{aligned} R^{(1)} &= (U^{(1)} - L^{(1)} - M^{(1)})C^{(1)}, \\ R^{(2)} &= (U^{(2)} - L^{(2)} - M^{(2)})C^{(2)}, \\ R^{(3)} &= K^{(3)}C^{(5)} + L^{(2)}C^{(2)} - U^{(1)}C^{(1)}, \\ R^{(4)} &= L^{(1)}C^{(1)} - U^{(2)}C^{(2)}, \\ R^{(5)} &= M^{(1)}C^{(1)} + M^{(2)}C^{(2)} - K^{(3)}C^{(5)} - K_{\text{sed}}C^{(5)} + K_b \frac{W}{h^2}, \end{aligned}$$

где  $U^{(1)}$  и  $U^{(2)}$  — удельные скорости потребления биогенных веществ бактериями и фитопланктоном соответственно, сут<sup>-1</sup>;  $L^{(1)}$  и  $L^{(2)}$  — удельные скорости метаболических выделений бактерий и фитопланктона соответственно, сут<sup>-1</sup>;  $M^{(1)}$  и  $M^{(2)}$  — удельные скорости отмирания бактерий и фитопланктона соответственно, сут<sup>-1</sup>;  $K^{(3)}$  — скорость разложения детрита, сут<sup>-1</sup>. Скорость убыли детрита из-за седиментации в водохранилище-регуляторе  $K_{\text{sed}} = K_0 h_0 / h$ , где  $h$  — средняя глубина водохранилища в текущий момент времени. Для водотока нижнего бьефа используется постоянное значение  $K_{\text{sed}} = 0.1$ , сут<sup>-1</sup> [7]. Величина  $K_b$  характеризует процесс взмучивания и оценивается на этапе калибровки.

Далее представлены уравнения, используемые в имитационной модели для описания жизнедеятельности функций микроорганизмов и других важных с экологической точки зрения процессов.

Рост бактерий и фитопланктона:

$$U^{(1)} = \frac{k_2 R_{TB}}{1 + \frac{C^{(1)}}{C^{(3)}}}, \quad U^{(2)} = \frac{k_1 R_{TF} R_{IF}}{1 + \frac{C^{(2)}}{\beta C^{(4)}}}.$$

Метаболические выделения бактерий и фитопланктона:

$$L^{(1)} = r_1 U^{(1)}, \quad L^{(2)} = r_2 U^{(2)},$$

где

$$r_1 = \frac{\frac{a_3 U^{(1)}}{a_4}}{\frac{1}{a_4} + U^{(1)}} + \left(1 - \frac{a_3}{a_4}\right), \quad r_2 = \frac{\frac{a_1 U^{(2)}}{a_2}}{\frac{1}{a_2} + U^{(2)}} + \left(1 - \frac{a_1}{a_2}\right).$$

Смертность бактерий и фитопланктона:

$$M^{(1)} = v_2 + v_3 \frac{C^{(1)}}{U^{(1)}}, \quad M^{(2)} = v_1 \frac{C^{(2)}}{U^{(2)}}.$$

Скорость разложения детрита:

$$K^{(3)} = \frac{1.2 \cdot 10^{-4}(e^{0.351T} - 1)}{1 + 3.0 \cdot 10^{-4}(e^{0.351T})}.$$

Использованы следующие зависимости трофических функций от условий внешней среды — температуры воды и освещенности [10]:

$$R_{IF} = \frac{e}{K_e h}(e^{-r_x} - e^{-r_l}),$$

$$K_e = K_a + K_b \cdot Chl_\alpha, \quad Chl_\alpha = \frac{C^{(2)}}{\alpha},$$

$$r_x = r_l e^{-K_e h}, \quad r_l = \frac{I}{I_{opt}},$$

$$I = \frac{I_{max}}{2} \left( 1 + \cos \left( \frac{2\pi(t_n - t_p)}{f} \right) \right), \quad I_{max} = \frac{2I_{cp}}{f},$$

$$R_{TB} = 0.3 + \frac{3.68 \cdot 10^{-3}(e^{0.403T} - 1)}{1 + 5.25 \cdot 10^{-3}e^{0.403T}}, \quad R_{TF} = 0.2 + \frac{2.2 \cdot 10^{-2}(e^{0.21T} - 1)}{1 + 2.8 \cdot 10^{-2}e^{0.21T}}.$$

Здесь  $I$  — функция освещенности, кал/(см<sup>2</sup>·сут),  $I_{opt}$  — оптимальное значение освещенности, кал/(см<sup>2</sup>·сут),  $I_{max}$  — максимальное значение освещенности, кал/(см<sup>2</sup>·сут),  $I_{cp}$  — среднесуточное значение освещенности,  $t_n$  — текущее время суток,  $t_p$  — время стояния солнца в зените (12 час).

Для оценки выноса минерального фосфора из дна в водную толщу реализован специальный модельный блок, описывающий трансформацию соединений фосфора в донных отложениях [8]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C^{(6)}}{\partial t} &= \frac{\alpha J^{(5)}}{\sigma L^{(1)}} - k_m C^{(6)}, \\ \sigma \frac{\partial C^{(7)}}{\partial t} &= k_m \sigma C^{(6)} - \frac{1}{L^{(1)}}(K_P(C^{(7)} - C^{(4)}) + V_\Phi C^{(4)}) - \frac{\partial C^{(8)}}{\partial t}, \\ C^{(8)} &= \gamma_P C^{(7)}. \end{aligned}$$

Здесь  $C^{(6)}$ ,  $C^{(7)}$  и  $C^{(8)}$  — концентрации соответственно обменного, минерального и сорбированного фосфора в илах в пересчете на единицу объема порового раствора;  $\alpha$  — стехиометрический коэффициент;  $f$  — фотопериод;  $\sigma$  и  $L_1$  — пористость и толщина донных отложений;  $k_m$  — коэффициент минерализации органики в донных отложениях;  $K_P$  — коэффициент переноса фосфатов в илах;  $V_\Phi$  — скорость фильтрации;  $\gamma_P$  — константа обратимой линейной сорбции фосфора.

В работе использована температурная зависимость параметров процессов в донных отложениях типа Аррениуса:

$$B_i = 1.09^{T-20} B_{0i},$$

где под  $i$ -ми компонентами вектора  $B$  подразумеваются соответственно  $K_P$  и  $\gamma_P$ .

Упомянутые массовые потоки фосфора на границе имеют вид:

$$\begin{aligned} J^{(5)} &= -k_{sed} C^{(5)} h + K_b \frac{W}{h}, \\ J^{(4)} &= k_P(C^{(7)} - C^{(4)}) + V_\Phi C^{(4)}. \end{aligned}$$

## 5. Численные алгоритмы

Численные алгоритмы решения рассмотренных задач основаны на методе конечных разностей. Для аппроксимации дифференциальных уравнений разностными вводится пространственно-временная сетка  $(t_n, x_i)$ :  $t_{n+1} = t_n + \tau$  ( $n = 1, \dots, N$ ),  $x_{i+1} = x_i + \Delta_i$  ( $i = 1, \dots, l$ ), где  $\tau = \text{const}$  — шаг по времени,  $\Delta_i$  — величина шага по пространственной переменной, постоянная внутри каждого гидравлического участка. Значения параметров в узлах сетки  $f(x_i, t_n)$  обозначим через  $f_i^n$ .

Расчет длины шага по  $x$  осуществляется таким образом, чтобы значение  $\Delta_i$  укладывалось по длине гидроучастка целое число раз, но было бы близко к заданному для всей расчетной области значению  $\bar{\Delta}$ . Таким образом, чем меньше отношение  $\bar{\Delta}$  к длине наименьшего участка, тем равномернее сетка по  $x$ .

**Алгоритм расчета гидравлических характеристик потока.** Значения гидравлических характеристик в стационарном приближении определяются из решения системы (2) согласно алгоритму:

$$\frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta_i} = \frac{Q_{\text{пр}}}{\Delta_i} = q, \quad (12)$$

$$\frac{z_{i+1} - z_i}{\Delta_i} = \left[ I_{0_{i+1}} + \frac{1}{B_{i+1}} \left( \frac{\partial \omega}{\partial x_h} \right)_{i+1} \text{Fr} - \frac{Q_{i+1} |Q_{i+1}|}{\omega_{i+1}^2 C_{i+1}^2 R_{i+1}} - \frac{2u_{i+1}}{g\omega_{i+1}} \cdot \frac{Q_{i+1} - Q_i}{\Delta_i} \right] \frac{1}{1 - \text{Fr}}. \quad (13)$$

Сначала по (12) рассчитывается значение  $Q$  в узлах расчетной сетки по известному значению  $Q_n$  в створе плотины гидроузла. На следующем шаге по известному значению  $Q(x_L)$  определяются  $h(x_L)$  и  $z_h = z_{\text{дн}} + h_L$ . Затем, решая уравнение (13) против потока, определяем начальное распределение  $z$ , по которому восстанавливается  $h$ .

**Алгоритм расчета температурного режима реки.** Для определения температурного режима применялся алгоритм, основанный на решении задачи (5)–(7) по неявной схеме бегущего счета первого порядка [1, 9]:

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\tau} + u_{i-1}^{n+1} \frac{T_i^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{\Delta_{i-1}} = \left[ \frac{S_n + S + \hat{S}_v}{c\rho} \cdot \frac{B}{\omega} \right]_i^n + \frac{q_i^n}{\omega_i^n} (T_{q_i}^n - T_i^n). \quad (14)$$

Схема безусловно устойчива.  $B$ ,  $u$ ,  $\omega$  определяются из решения предыдущей задачи. Начальное распределение температуры в потоке находится из решения стационарного варианта исходной задачи.

Результаты расчетов температурных режимов рек отличаются от натуральных данных не более чем на 10% [1, 9].

**Алгоритм расчета процессов эвтрофирования в русловом потоке.** Для определения режима эвтрофирования применялся численный алгоритм, основанный на неявной схеме бегущего счета первого порядка. Схема применяется к уравнению переноса для концентраций  $C^{(k)}$   $k$ -х компонентов водной экосистемы (11) в предположении о пренебрежимой малости изменений гидравлических характеристик внутри расчетных участков и в течение расчетного месяца:

$$\frac{C_i^{(k)n+1} - C_i^{(k)n}}{\tau} + \frac{u_i^{n+1} C_i^{(k)n+1} - u_{i-1}^{n+1} C_{i-1}^{(k)n+1}}{\Delta_{i-1}} = R_i^{(k)n+1} + \left[ J^{(k)} \frac{B}{\omega} \right]_i^{n+1}. \quad (15)$$

В случае наличия притока в каком-либо створе реки средняя по сечению температура вычисляется по формуле:

$$T_+ = \frac{T_- Q_- + T_{\text{пр}} Q_{\text{пр}}}{Q_- + Q_{\text{пр}}}, \quad (16)$$

где  $T_{\text{пр}}$  и  $Q_{\text{пр}}$  — температура и расход притока, знак (+), (–) означает величину параметра соответственно ниже и выше створа впадения притока.

Концентрация каждого моделируемого вещества в этом случае также пересчитывается как средневзвешенная, аналогично (16):

$$C_+^{(k)} = \frac{C_-^{(k)} Q_- + C_{\text{пр}}^{(k)} Q_{\text{пр}}}{Q_- + Q_{\text{пр}}}, \quad (17)$$

где  $C_{\text{пр}}^{(k)}$  — концентрация  $k$ -го вещества в притоке.

## 6. Структура комплекса программ

Описанные выше алгоритмы реализованы в виде комплекса программ на IBM PC. Тексты программ написаны на алгоритмическом языке FORTRAN-77 с использованием технологии модульного программирования. Это позволяет компоновать программы в соответствии с особенностями решаемых задач, используя готовые блоки, и дополнять их блоками для моделирования ранее не учитываемых физических процессов [9].

Программы, входящие в структуру комплекса, можно разбить на две основные группы: сервисные и функциональные [9]. К первым относятся программы предварительной обработки исходных данных. Они преобразуют исходную информацию из текстовых файлов и записывают в файлы базы данных, которая функционирует в рамках комплекса программ. Информация в текстовые файлы вводится пользователями комплекса при помощи текстовых редакторов из таблиц. К группе функциональных модулей относятся а) программы начала и продолжения счета для проведения вычислительных экспериментов, требующих больших времен счета на ЭВМ; б) программы для проведения расчетов на системе русел; в) программы краткосрочных расчетов; г) программы для проведения расчетов отдельных физических параметров.

База данных, функционирующая в рамках комплекса программ, имеет два иерархических уровня. Первый уровень представляют управляющие файлы, создаваемые и редактируемые пользователем комплекса при помощи стандартных текстовых редакторов. В эти файлы в определенной последовательности заносятся имена файлов исходных данных и файлов с выходной информацией. Файлы исходных данных представляют второй иерархический уровень базы данных; в них содержится информация о метеорологических параметрах, морфометрические характеристики русел, данные о схематизации водоемов и водотоков, информация о притоках, константы для расчета трофических функций. Другая группа файлов второго уровня представляет собой набор выходной информации, предназначенной для графической обработки или вывода в виде таблиц. Наконец, третья группа файлов этого же иерархического уровня — файлы межпрограммного интерфейса, через которые передаются данные для продолжения счета либо по временной координате, либо по пространству, при проведении вычислительного эксперимента на системе русел.

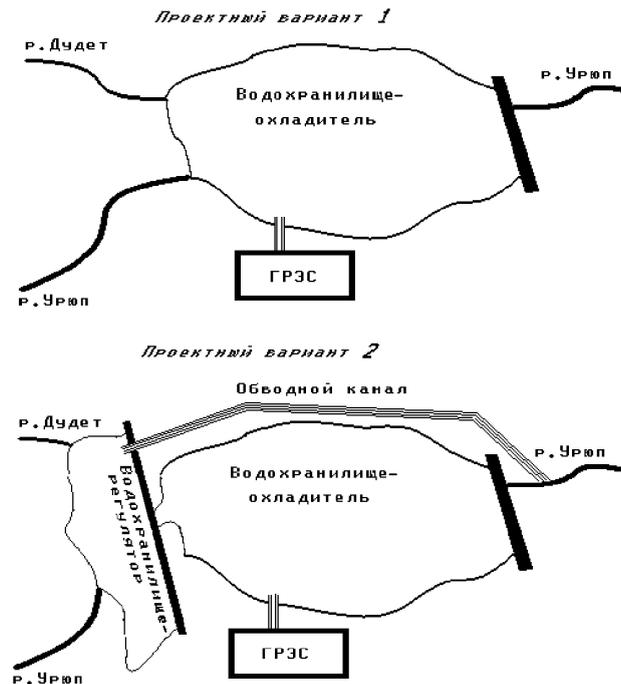


Рис. 1. Схемы проектных вариантов Верхне-Урюпского гидроузла.

## 7. Вычислительный эксперимент для Верхне-Урюпского водохранилища-охладителя (Березовская ГРЭС-II)

С помощью описанного выше комплекса программ был проведен ряд вычислительных экспериментов для проектируемого водохранилища-охладителя Березовской ГРЭС-II. Необходимость проведения расчетов вызвана тем, что в результате эксплуатации водохранилища-охладителя в нем будет интенсивно развиваться процесс эвтрофирования [10, 11], и теплая, сильно загрязненная биостоком (фито- и бактериопланктоном) и биогенами вода станет сбрасываться из охладителя в нижний бьеф (р. Урюп).

В работе построена и использована в расчетах схематизация русла с непризматическим ложем р. Урюп на участке нижнего бьефа Верхне-Урюпского гидроузла длиной 89.7 км [12]. Серии расчетов были проведены для двух проектных вариантов гидросооружений и во втором варианте для двух режимов их работы. Второй проектный вариант отличается от первого наличием водохранилища-регулятора, которое находится выше водохранилища-охладителя, и наличием обводного канала длиной 14 км. В случае реализации второго варианта вода из водохранилища-регулятора, не загрязненного тепловым стоком ГРЭС, через обводной канал будет поступать в обход водохранилища-охладителя в его нижний бьеф, что снизит загрязнение основного потока р. Урюп.

Оба проектных варианта схематически изображены на рис. 1.

Вычислительный процесс построен в соответствии с допущениями, связанными с особенностями протекания исследуемых явлений и принципом их разделения по физическим процессам. *Первое допущение* заключается в том, что гидравлические характеристики потока влияют на температурный режим и биохимические процессы; термические характеристики определяют изменение параметров эвтрофирования. *Второе допущение*: вза-

имное влияние процессов в обратной последовательности настолько мало, что им можно пренебречь. Это позволяет использовать при численном моделировании следующую расчетную схему:

- а) определение гидравлических параметров руслового потока;
- б) расчет изменения вдоль по потоку температуры воды в реке;
- в) расчет изменения вдоль по потоку концентраций компонент водной экосистемы.

Если известно подробное распределение граничных условий во времени, то все три шага расчетной схемы выполняются на каждом шаге по времени. В описываемых вычислительных экспериментах определение гидравлических параметров руслового потока и температуры воды р. Урюп на моделируемом участке нижнего бьефа водохранилища-охладителя велось по среднемесячным данным расходов и метеорологических параметров (кроме солнечной радиации, которая рассчитывается по формулам (9), (10) в зависимости от времени суток), что позволило вынести из цикла по времени расчет гидравлических характеристик. Тестовые расчеты показали, что это не существенно меняет значения температуры и параметров эвтрофирования. Выяснилось, что выведение из временного цикла расчета температуры воды и замена ее значений на среднемесячные приводит к существенным отличиям в результатах расчетов.

Одной из важных проблем при использовании математической модели эвтрофирования явилось определение внутренних параметров (идентификация). Ввиду того что исследуемый объект — Верхне-Урюпский гидроузел — не существует в природе, о процедуре идентификации в полном смысле этого слова говорить нельзя. Поэтому для детализации констант и коэффициентов модели использованы характеристики водоема-аналога. В качестве последнего было взято оз. Балатон, которое испытывает интенсивное антропогенное эвтрофирование, и по нему существует достаточно полный набор необходимых данных [13]. На рис. 2 приведены результаты натуральных наблюдений и расчетов по предложенной в работе фосфорной модели водной экосистемы. Как видно, модель достаточно точно воспроизводит режим трансформации компонентов эвтрофной водной экосистемы.

На этом основании при прогнозном расчете процесса эвтрофирования в объектах Верхне-Урюпского гидроузла использовались найденные в результате оптимизационных расчетов значения коэффициентов модели, характеризующие зависимость интенсивности биохимических процессов: потребления, выделения, смертности, метаболизма планктона и др. — в эвтрофной водной экосистеме от задаваемых внешних условий. Расчеты проводились для условий очень маловодного года [15], что позволяет оценить наиболее неблагоприятный случай динамики параметров эвтрофирования в проектируемом водном объекте.

По данным натуральных наблюдений и прогнозным оценкам о химическом составе поверхностных вод рассматриваемого участка речного бассейна [10, 11, 15, 16] были выбраны сценарии содержания компонентов фосфорной модели в притоке, поступающем в водохранилище-регулятор, сбросах из водохранилища-охладителя и р. Береш, являющейся притоком р. Урюп.

Сценарий среднемесячных концентраций компонентов в стоке из водохранилища-охладителя выбирался из соображений, заведомо ухудшавших ситуацию. Считалось, что концентрация бактерий увеличивается более чем в 100 раз по сравнению с притоком — р. Урюп до впадения в водохранилище-регулятор [10]. Концентрация фитопланктона в сбрасываемой воде в мае — сентябре считалась равной 40 мгР/л [11]. Концентрация фосфатов в эвтрофных водных экосистемах в период интенсивного развития водорослей обычно бывает невысока ввиду их выедания фитопланктоном [13, 14] и в расчетах полагалась близкой к 0.01 мгР/л.

Расчеты в нижнем бьефе проведены для следующих вариантов (см. рис. 1):

*Вариант 1:* нижний бьеф начинается от водохранилища-охладителя, из которого в течение всего года производится сброс воды.

*Вариант 2а:* нижний бьеф начинается от водохранилища-регулятора (включая обводной канал). В нижний бьеф в течение года сбрасывается санитарный попуск, назначение которого — обеспечить равномерное поступление воды в объеме, необходимом для водопользования; лишь в период паводка (май — июнь) сбрасывается сильно загрязненная и теплая вода из водохранилища-охладителя.

*Вариант 2б* отличается от варианта 2а тем, что через обводной канал в нижний бьеф поступает не санитарный, а меженный попуск. Иначе говоря, варианты 2а и 2б отличаются значениями расходов, пропускаемых по каналу и сбрасываемых из водохранилища-охладителя.

В течение года учитывается разбавляющее влияние притока — р. Береш. Заканчивается нижний бьеф впадением в р. Чулым.

Гидравлические параметры рассчитывались по уравнениям Сен-Венана в квазистационарном приближении для условий р. Урюп и пересчитывались на начало каждого месяца в связи с изменением среднемесячных значений расходов. Изменение температуры и концентрации гидрохимических компонентов определялось по нестационарным моделям с шагом 1 час. Влияние притока р. Береш рассчитывается по формулам (16), (17).

В вычислительных экспериментах по проектным вариантам 2а и 2б наличие водохранилища-регулятора и обводного канала привело к необходимости провести серию расчетов для трех смежных русел. Расчеты выполнялись в следующей последовательности:

определяются гидротермический режим водохранилища-регулятора по стационарному варианту и режим эвтрофирования [14];

определяются гидротермический режим и режим эвтрофирования по стационарному варианту для обводного канала, граничные условия в начальном створе канала берутся из решения предыдущей задачи;

определяются гидротермический режим и режим эвтрофирования для нижнего бьефа водохранилища-охладителя, при этом в качестве граничных условий в начальном створе берутся значения, полученные для последнего створа канала, а поступления из водохранилища-охладителя рассматриваются как совместные с притоком в первом створе моделируемого участка и рассчитываются по формулам (16), (17).

Некоторые из результатов расчетов приведены на рис. 3. Осцилляции на графиках связаны с суточными колебаниями значений исходных параметров.

*Основные выводы, полученные из результатов вычислительных экспериментов.*

1. При реализации первого проектного варианта биомасса водорослей в замыкающем створе нижнего бьефа в мае — августе может составлять 30–32 мгР/л в сыром весе, снижаясь до 15 мгР/л в сентябре. Ниже будет содержание фитопланктона при реализации вариантов 2а и 2б — соответственно 14–16 мгР/л в мае — августе и до 5 мгР/л в сентябре. Варианты 2а и 2б по степени эвтрофирования нижнего бьефа практически не отличаются. Таким образом, полученные в предположении о заданном (40 мгР/л) содержании фитопланктона в сбросах из охладителя значения концентраций водорослей в нижнем бьефе в летний период в соответствии с эколого-санитарной классификацией качества поверхностных вод суши [17] характеризуют водоток нижнего бьефа как сильно загрязненный для случая реализации любого из трех проектных вариантов. Концентрация растворенного органического фосфора будет колебаться в пределах 50–100 мгР/л, минерального — в

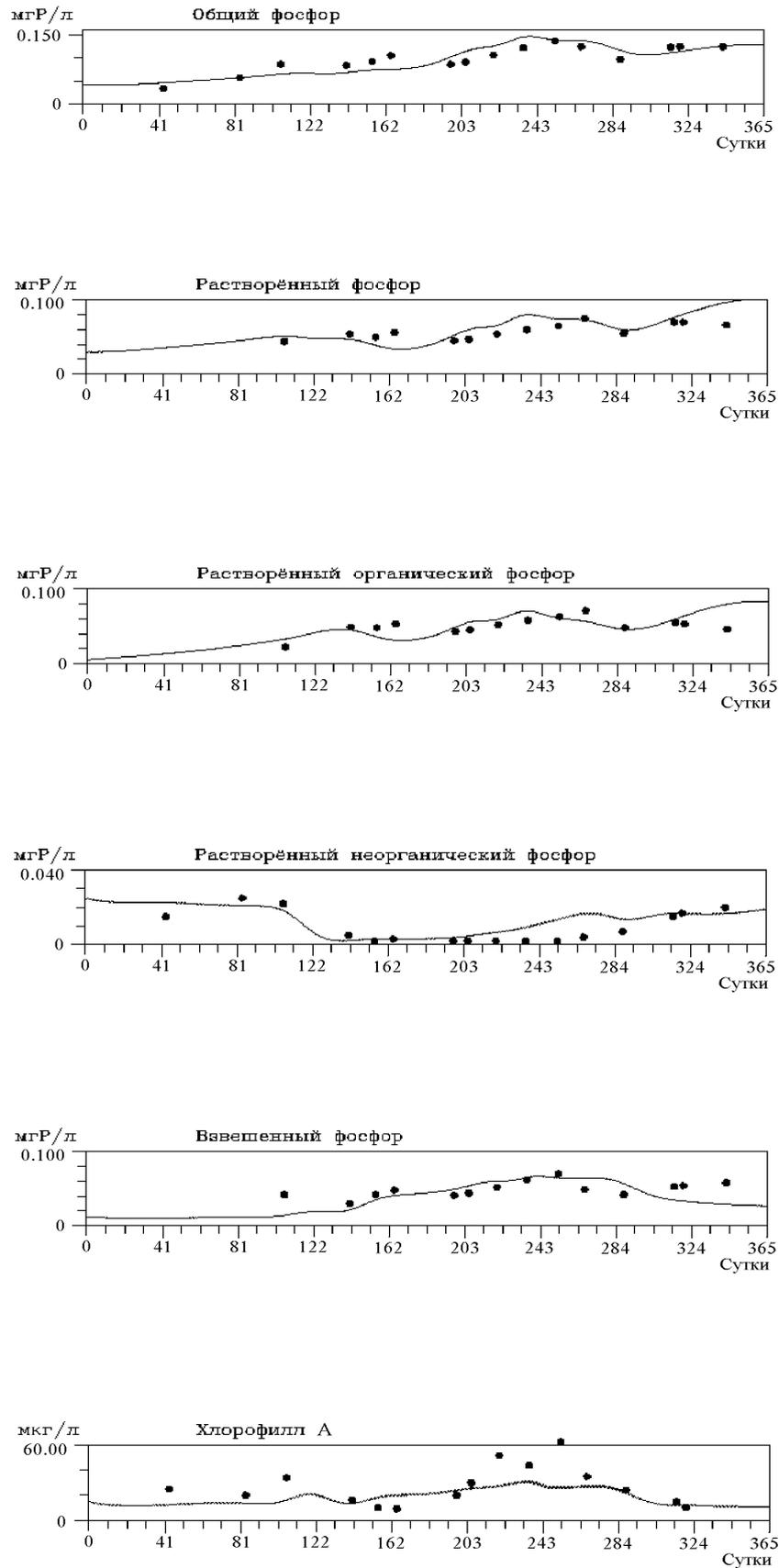


Рис. 2. Результаты верификации фосфорной модели по данным эвтрофирования оз. Балатон. ● — опытные, — — расчетные данные.

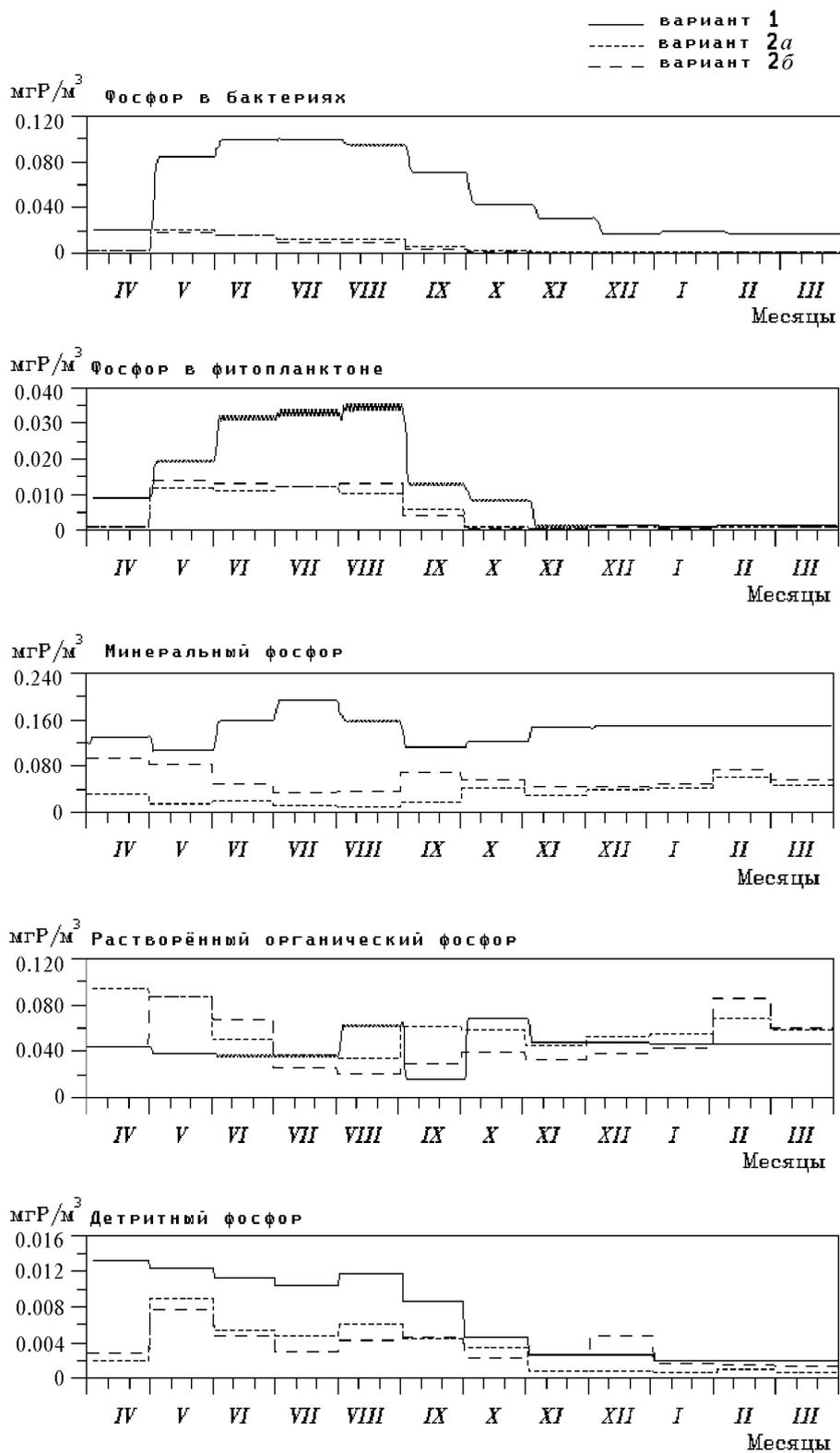


Рис. 3. Концентрации компонентов экосистемы в замыкающем створе нижнего бьефа водохранилища-охладителя.

пределах 20–120 мгР/л, детритного (взвешенного) — в пределах 2–14 мгР/л. Реализация вариантов 2а и 2б приведет к примерно одинаковым последствиям по степени влияния на процесс эвтрофирования нижнего бьефа и более предпочтительна, чем вариант 1, так как при этом биомасса фитопланктона в замыкающем створе снизится вдвое по сравнению с водохранилищем-охладителем, но тем не менее на два и более порядка может превышать современный уровень эвтрофирования р. Урюп.

2. В осенне-зимний период содержание бактерио- и фитопланктона в нижнем бьефе, как и следовало ожидать, оказалось существенно ниже, чем в теплое время года.

3. Содержание абиотических форм фосфора (растворенной и взвешенной органики и фосфатов) в нижнем бьефе при реализации всех трех проектных вариантов в течение года будет практически близким и станет изменяться в пределах, обычных для поверхностных вод Сибири.

Авторы выражают благодарность В. Ю. Агейкову за помощь в выполнении расчетов.

## Список литературы

- [1] БЕЛОЛИПЕЦКИЙ В. М., ГЕНОВА С. Н., ТУГОВИКОВ В. Б., ШОКИН Ю. И. *Численное моделирование задач гидроледотермики водотоков*. ИВТ СО РАН, Новосибирск, ВЦ СО РАН, Красноярск, 1993.
- [2] САМАРСКИЙ А. А. Математическое моделирование и вычислительный эксперимент. *Вестн. АН СССР*, 5, 1979, 38–49.
- [3] HARLEMAN D., BROCARD D., NAJARIAN T. *A predictive model for transient temperature distributions in unsteady flows*. Cambridge, 1973 (MIT, Report, No175).
- [4] КАЗАКОВ А. Л., ЛЫКОСОВ В. Н. О параметризации взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью при численном моделировании атмосферных процессов. *Труды Западно-Сибирского Регионального НИИ: “Численные методы прогноза погоды”*, вып. 55, М., 1982, 3–20.
- [5] АБРАМЕНКОВ Н. М. Моделирование процесса замерзания шугоносных рек. *Труды САННИИ им. В. А. Бугаева*. Гидрометеиздат, вып. 101(182), М., 1984, 3–100.
- [6] ЦХАЙ А. А., АГЕЙКОВ В. Ю. Математическое моделирование экосистемы проектируемого водохранилища. В *“Применение компьютера в гидротехнике и охрана водных ресурсов”*, София, 1990, 428–439.
- [7] АЙЗАТУЛЛИН Т. А., ЛЕБЕДЕВ Ю. М. Моделирование трансформации органических загрязнений в экосистемах и самоочищения водотоков и водоемов. В *“Итоги науки и техники. Сер. Общая экология. Биоценология. Гидробиология”*, т. 4, ВИНТИ, М., 1977, 43.
- [8] ЦХАЙ А. А., ТУШЕВ А. Н., ЩЕРБИНИНА Л. Ю. Модельная оценка выделения биогенов из ложа водохранилища при изменении кислородного режима. В *“Математическое моделирование в проблемах рационального природопользования”*, Ростов-на-Дону, 1991, 39.

- [9] ТУГОВИКОВ В. Б. *Численное моделирование гидроледотермических режимов нижних бьефов ГЭС*. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1991.
- [10] *Разработка прогноза химического состава воды водоема-охладителя Березовской ГРЭС-2: Отчет о НИР ГХИ Госкомгидромета* (научн. рук. Л. Н. Назарова). Ростов-на-Дону, 1990.
- [11] *Оценка современного состояния и разработка прогноза качества воды водных объектов р. Чулым по гидрохимическим и гидробиологическим показателям: Отчет о НИР ГХИ Госкомгидромета* (научн. рук. Л. Н. Назарова). Ростов-на-Дону, 1990.
- [12] *Разработка модели эвтрофирования нижнего бьефа Верхне-Урюпского водохранилища (научно-информационный отчет по второму этапу)*. Алтайский краевой научно-технический центр, 1991.
- [13] ЛЕОНОВ А. В. *Математическое моделирование трансформации соединений фосфора в пресноводных экосистемах на примере оз. Балатон*. М., 1986.
- [14] *Эволюция круговорота фосфора и эвтрофирование природных вод* (Под. ред. К. Я. Кондратьева и И. С. Коплан-Дикса). Наука, Ленинград, 1988.
- [15] *Разработка модели эвтрофирования нижнего бьефа Верхне-Урюпского водохранилища: Гидрологическая записка*. Красноярск, 1991.
- [16] *Разработка прогноза качества вод реки Урюп с учетом вклада в их загрязнение сточных вод предприятий первой очереди строительства КАТЭКа: Отчет о НИР СКТБ "Наука" СО АН СССР* (научн. рук. А. М. Мартынова). Красноярск, 1990.
- [17] РОМАНЕНКО В. Д. и др. *Экологическая оценка воздействия гидротехнического строительства на водные объекты*. Киев, 1990.

Поступила в редакцию 15 сентября 1995 г.