

# ГИДРОБИОЛОГИЯ БАССЕЙНА АМУРА

Владивосток  
1978



## ПРОГНОЗ ПРОДУКТИВНОСТИ И КАЧЕСТВА ВОДЫ В ЗЕЙСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Ю. М. Лебедев, В. В. Богатов, Э. П. Жуков,  
С. Г. Каспарова, М. А. Смотров

Зарегулирование водотоков приводит к перестройке водных экосистем: как правило, резко повышается их продуктивность, меняется характер круговорота вещества, возрастает закрытость систем по сравнению с речными. Все это часто ведет к ряду нежелательных последствий для некоторых водопользователей, в первую очередь для водоснабжения и рыбного хозяйства. Так, увеличение первичной продукции приводит к возникновению более интенсивного «цветения», повышается нагрузка водоема органическим веществом, возрастают перманганатная и бихроматная окисляемость, БПК, цветность. В связи с этим стоимость водоподготовки при бытовом водоснабжении существенно увеличивается. Дополнительная обработка воды требуется для ряда отраслей промышленности (тонкой химической технологии, целлюлозной, пищевой и т. д.). Понятно, что чем хуже качество воды как исходного сырья, тем дороже стоит его переработка.

В некоторых водохранилищах в результате массового цветения водорослей вообще становится невозможной нормальная эксплуатация водозаборов (Майстренко, Гак, 1972). При разложении биомассы водорослей в воду выделяются такие токсичные продукты, как фенол, индол, скатол, цианиды и др. (Топачевский, Сиренко, Цееб, 1975). Увеличение первичной продуктивности водохранилищ до определенного предела благоприятно для рыб, поскольку положительно коррелирует с их кормовой базой. Однако дальнейшее накопление биомассы первичных продуцентов приводит к возникновению дефицита кислорода в воде в результате их постоянного разложения. Причем заморы могут возникать не только зимой, когда водная масса отделена от атмосферы льдом, но и летом.

К сожалению, эти биологические особенности водохранилищ при их проектировании не учитываются. Так, например, при строительстве Киевского водохранилища на Днепре неоправданно была завышена площадь мелководий, что привело к резкому ухудшению качества воды как в самом водохранили-

ще, так и к эвтрофикации ниже расположенных водохранилищ Днепровского каскада (Цееб, 1967). В результате пришлось создавать проект реконструкции водохранилищ. Перестройка только для Кременчугского водохранилища обойдется в сотни миллионов рублей и растянется на многие годы (Майстренко, Гак, 1972). Такое положение связано с отсутствием инженерных методов расчета интенсивности биологических процессов в проектируемых водоемах, что дало бы возможность еще на стадии проектного задания просчитать несколько вариантов и выбрать наиболее оптимальный.

Если при проектировании водохранилищ на ЕТС можно выбрать водоем-аналог, то при создании водохранилищ на реках Дальнего Востока такой прием использовать невозможно, т. к. подобное строительство здесь ведется впервые. В связи с этим разработка расчетной модели и ее применение для прогноза качества воды и продуктивности Зейского водохранилища представляет несомненный интерес.

Водоохранилища, предназначенные для водоснабжения городов и населенных пунктов, защищены санитарными правилами от сброса в них сточных вод. Поэтому качество воды в таких водохранилищах определяется процессами синтеза и деструкции органического вещества, т. е. степенью их эвтрофицированности.

В 1961 г. И. К. Шеломовым и М. В. Федосовым была предложена математическая модель круговорота органического вещества в водных экосистемах (Шеломов, Федосов, 1961). Модель основана на теоретическом положении, по которому процессы переработки органического вещества определяются в первую очередь его запасами, вычисляемыми по содержанию органического азота в данной водной массе. Проведенные авторами исследования показали хорошую сходимость расчетных и практических величин для таких различных по характеру водоемов, как Азовское, Черное и Каспийское моря.

Модель построена на основе следующих посылок:

1) распад и синтез органического вещества в водоеме рассматриваются как две стороны одного процесса;

2) после сформирования отдельной водной массы поступление аллохтонного органического вещества практически отсутствует и биогенные вещества находятся в замкнутом круговороте, не считая обмена между водой и донными отложениями;

3) концентрация биогенных веществ зависит не от абсолютного значения первичной продукции, а от соотношения между скоростями процессов синтеза и минерализации органического вещества; замкнутая система «запасы биогенных элементов — скорость синтеза — скорость распада» контролируется скоростью распада;

4) биогенные элементы входят в состав органического вещества в определенных соотношениях. В качестве базисного



элемента выбран азот, который независимо от условий питания естественных популяций содержится в планктоне в постоянном процентном отношении.

Первое уравнение модели И. К. Шеломова и М. В. Федосова

$$P = -28,6 m_0 V \lg[1 - \varphi(t)], \quad (1)$$

где  $P$  — годовая первичная продукция органического вещества всего водоема;  $m_0$  — концентрация органического азота, мг/м<sup>3</sup>; 28,6 — коэффициент перехода от органического азота к органическому веществу,  $V$  — объем водоема, м<sup>3</sup>,  $\varphi(t)$  — степень распада органического вещества в течение года (в относительных долях).

Уравнение выражает связь между двумя неизвестными: первичной продукцией и скоростью распада органического вещества.

Вторым уравнением устанавливается другая независимая связь между теми же неизвестными. Она находится при рассмотрении процесса разложения органического вещества. Пусть для органического углерода она равна  $\beta$ , а его содержание в органическом веществе — 50%. Тогда количество органического вещества, захороняемого за год в донных отложениях —

$$M_{\text{орг-}} = 2\beta M_{mb}, \quad (2)$$

где  $M_{mb}$  — количество осадков, накапливающихся в водоеме за год. Отсюда

$$M_{\text{орг-}} = 2\beta \frac{(1-\alpha) d_{H_2O} d_{mb} s \delta}{\alpha \cdot d_{mb} + (1-\alpha) d_{H_2O}}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  — средняя влажность осадков,  $d_{H_2O}$  — удельный вес воды, г/см<sup>3</sup>,  $d_{mb}$  — удельный вес сухого вещества донных отложений, г/см<sup>3</sup>,  $s$  — площадь зеркала водоема, м<sup>2</sup>,  $\delta$  — накопление осадков за год, м.

Понятно, что доля нераспавшегося за год органического вещества равна

$$1 - \varphi(t) = \frac{M_{\text{орг-}}}{P}, \quad (4)$$

или

$$P = \frac{M_{\text{орг-}}}{1 - \varphi(t)}. \quad (4a)$$

Введя в (4a) выражение (3), можно написать систему двух уравнений с двумя неизвестными  $P$  и  $\varphi(t)$

$$\begin{cases} P = -28,6 m_0 V \cdot \ln[1 - \varphi(t)] \\ P = \frac{2\beta(1-\alpha) d_{H_2O} \cdot d_{mb} \cdot s \cdot \delta}{[1 - \varphi(t)][\alpha d_{mb} + (1-\alpha) d_{H_2O}]} \end{cases} \quad (5)$$

В таком виде система (5) принималась нами для расчета продуктивности малых водохранилищ ЕТС. Эта система является ядром модели и все остальные уравнения, описывающие различные параметры качества воды, выводятся из него. Верификация модели на Можайском водохранилище дала удовлетворительные результаты (Айзатуллин, Лебедев, 1977). Однако в связи со спецификой Зейского водохранилища модель пришлось значительно видоизменить. Прежде всего, в связи с относительно небольшим водообменом мы отказались от принятой ранее схемы перемещения водных масс (Ершова, 1975). Введена поправка на термическую стратификацию. Раздельно рассмотрена трансформация авто- и аллохтонного органического вещества. В окончательном виде модель имеет такой вид.

Прежде всего определяется объем воды на  $i$ -м участке водохранилища при фиксированных уровнях  $h_s$

$$V_{i,s} = f(h_s); \quad (i=1, 2, \dots, n; s=1, 2, \dots, m). \quad (6)$$

Затем по интерполяционному уровню определялся объем  $i$ -го участка на  $t$ -м шаге ( $V_{i,t}$ ) при отметке уровня  $h_t$ . Расстояния между фиксированными уровнями были взяты равными 5 м, что обусловлено характером карты, по которой велась работа

$$V_{i,t} = V_{i,s} - (V_{i,s} - V_{i,s-1}) \frac{h_s - h_t}{5}; \quad (t=1, 2, \dots, k; h_s \geq h_t) \quad (7)$$

и полный объем водохранилища

$$V_t^n = \sum_i V_{i,t}. \quad (8)$$

Верхняя граница металимниона (нижняя граница активной зоны  $h_t^p$ ) рассчитывается как разница между текущей отметкой уровня и мощностью эпилимниона ( $EP_t$ )

$$h_t^p = h_t - EP_t. \quad (9)$$

Тогда объем  $i$ -го участка от верхней границы металимниона до дна из интерполяционного уравнения будет

$$V_{i,t}^p = V_{i,s} - (V_{i,s} - V_{i,s-1}) \frac{h_s - h_t^p}{s}, \quad (10)$$

$$(h_s \geq h_t^p > h_{s-1}).$$

Водообмен между участками определяется по водному балансу

$$W_{i,t} = W_{i-1,t} + V_{i,t-1} - V_{i,t} + 0,5W_{i,t-1}^p + 0,5W_{i,t}^p, \quad (11)$$

где  $W_{i,t}$  — приход воды на  $i$ -й участок водохранилища из участка, расположенного выше;  $W_{i,t}$  — объем речного стока в



$i$ -й участок, а  $V_{i,t}^0$  — объем воды, оставшийся в  $i$ -м участке с шага  $t-1$ . Получаем

$$V_{i,t}^0 = V_{i,t-1} - W_{i,t}. \quad (12)$$

Концентрация органического вещества, поступающего вместе с речной водой, определяется по корреляционному уравнению

$$Y_{i,t} = a_i + b_i \left( \frac{W_{i,t-1}^p + W_{i,t}^p}{2} \right), \quad (13)$$

где  $Y_{i,t}$  — средняя концентрация органического вещества в реках, впадающих в водохранилище на  $i$ -м участке,  $a_i$  и  $b_i$  — коэффициенты.

Содержание органического вещества в воде  $i$ -го участка ( $L_{i,t}^A$ ) вычисляется по балансовому уравнению

$$L_{i,t}^A = Y_{i,t-1}^A \frac{V_{i,t}^0}{V_{i,t}} + Y_{i-1,t-1}^A \frac{W_{i-1,t}^p}{V_{i,t}} + 0,5Y_{i,t-1} \frac{W_{i,t-1}^p}{V_{i,t}} + 0,5Y_{i,t} \frac{W_{i,t}^p}{V_{i,t}}, \quad (14)$$

где  $Y_{i,t}^A$  — концентрация аллохтонного органического вещества до перемешивания водных масс. Сходным образом находится и содержание автохтонного органического вещества

$$L_{i,t}^B = Y_{i,t-1}^B \frac{V_{i,t}^0}{V_{i,t}} + Y_{i-1,t-1}^B \frac{W_{i-1,t}^p}{V_{i,t}}. \quad (15)$$

По содержанию органического вещества определяется концентрация органического азота авто- и аллохтонного генезиса

$$N_{i,t}^A = 0,02L_{i,t}^A, \quad (16)$$

$$N_{i,t}^A = 0,08L_{i,t}^B. \quad (17)$$

В качестве условия, определяющего концентрацию азота в речном стоке, принят общий объем речного стока в водохранилище

$$E_t = \sum W_{i,t}^p, \quad (18)$$

$$\begin{cases} n_t = 0,6 & (E_t > 1800) \\ n_t = 0,4 & (E_t \leq 1800). \end{cases} \quad (19)$$

Общая концентрация азота в воде  $i$ -го участка водохранилища определяется из условия

$$m_{i,t} = 1,0 \quad (EP_t = 0),$$

$$m_{i,t} = N_{i,t}^A + N_{i,t}^B + 0,5n_{t-1} \frac{W_{i,t-1}^p}{V_{i,t}} + 0,5n_t \frac{W_{i,t}^p}{V_{i,t}}. \quad (20)$$

Температурная поправка для скорости биологических процессов находится по уравнению

$$q_t = 1,05^{\uparrow(T_t - 20)}, \quad (21)$$

где  $T_t$  — температура воды.

Площадь  $i$ -го участка на  $t$ -м шаге ( $S_{i,t}$ ) рассчитывается по интерполяционному уравнению

$$s_{i,t} = s_{i,s} - (s_{i,s} - s_{i,s-1}) \frac{h_s - h_t}{5}, (h_s \geq h_t > h_{s-1}; s = 1, 2, \dots, P), \quad (22)$$

где

$$s_{i,s} = f(h_s).$$

После этого можно переходить собственно к расчету продуктивности и качества воды в водохранилище.

Очевидно, что в период ледостава первичная продукция должна быть равна 0. Поэтому

$$P'_{i,t} = 0; \quad (EP_t = 0). \quad (23)$$

Для летнего времени первичная продукция рассчитывается по несколько модифицированному уравнению (Шеломов, Федосов, 1961):

$$\begin{cases} P'_{i,t} = 12,5m_{i,t} (V_{i,t} - V_{i,t}^p) \ln(1-\varphi); \\ P'_{i,t} = \frac{2\beta(1-\alpha)\alpha s_{i,t}\delta}{(1-\varphi)(\alpha d + 1-\alpha)}; \quad (EP_t > 0), \end{cases} \quad (24)$$

где  $\beta$  — доля органического углерода в донных отложениях,  $\alpha$  — влажность донных отложений в относительных долях,  $d$  — объемный вес донных отложений, г/см<sup>3</sup> или т/м<sup>3</sup>,  $\delta$  — осадко-накопление, м/год,  $\varphi$  — оборачиваемость органического вещества, год<sup>-1</sup>.

По полученному значению  $P'_{i,t}$  можно найти суточную первичную продукцию, г/м<sup>2</sup>, приняв, что фотосинтез планктона возможен 180 дней в году

$$P_{i,t} = \frac{P'_{i,t} \cdot q_t}{180 \cdot S_{i,t}}. \quad (25)$$

Константа скорости распада при 20° определяется из уравнения

$$k_{i,t} = \frac{1}{365} \frac{\ln(1-\varphi)}{q_t}, \quad (26)$$

а суммарное количество органического вещества по формуле

$$L_{i,t}^S = L_{i,t}^A + L_{i,t}^B \quad (27)$$

При расчете перманганатной окисляемости (ПО) учитывается, что константа скорости разложения органического вещества для разных водных масс имеет разную величину, что свидетельствует о непостоянстве соотношения ПО/БО (БО — бихроматная окисляемость). Поэтому, согласно уравнению мономолекулярной реакции, в расчетах принято, что доля ПО ( $R_{i,t}$ ) обратно пропорциональна —  $\lg k_{i,t}$

$$R_{i,t} = 0,65 \frac{L_{i,t}^S}{-\lg k_{i,t}} \quad (28)$$

БПК<sub>5</sub> рассчитывается по формуле

$$D_{i,t} = L_{i,t}^S [1 - e^{\uparrow(-5k_{i,t})}] \cdot 1,65 \quad (29)$$

Константа скорости распада аллохтонного органического вещества  $k_{i,t}^A$  считается пропорциональной соотношению содержания азота в алло- и автохтонном органическом веществе

$$k_{i,t}^A = k_{i,t} \frac{0,02L_{i,t}^A}{0,02L_{i,t}^A - 0,08L_{i,t}^B} \quad (30)$$

Содержание аллохтонного органического вещества в  $i$ -м участке на шаге  $t$  вычисляется по уравнению мономолекулярной реакции

$$Y_{i,t}^A = L_{i,t}^A e^{\uparrow(-15k_{i,t}^A q_i)} \quad (31)$$

а величина его распада по уравнению

$$D_{i,t}^A = L_{i,t}^A [1 - e^{\uparrow(-8,15k_{i,t}^A)}] \quad (32)$$

Концентрация аллохтонного органического вещества рассчитывается по разнице содержания азота авто- и аллохтонного генезиса

$$Y_{i,t} = 12,5(m_{i,t} - 0,02Y_{i,t}^A) \quad (33)$$

Цветность воды, обусловленная аллохтонным органическим веществом, определяется по корреляционному отношению, которое для бассейна р. Зен несколько отличается от уравнений для рек и водоемов ЕТС введением члена  $D_{i,t}^A$ .

$$C_{i,t}^A = 40 + 3,75(R_{i,t} - D_{i,t}^A) \quad (34)$$

Принято также, что цветность, обусловленная аллохтонным органическим веществом, численно равна ПО. Отсюда общая цветность воды

$$C_{i,t} = C_{i,t}^A + R_{i,t} \quad (35)$$

Для зимнего периода расчет несколько упрощается, поскольку не идут процессы новообразования органического вещества, а константа скорости распада авто- и аллохтонного органического вещества принимается постоянной. Поэтому уравнение (31) сокращается до вида

$$Y_{i,t}^A = 0,92L_{i,t}^A \quad (36)$$

а уравнение (33) до вида

$$Y_{i,t}^B = 0,84L_{i,t}^B \quad (37)$$

Потребление кислорода в толще воды пропорционально интенсивности распада органического вещества.

Отсюда

$$M_{i,t} = 1,65(0,08L_{i,t}^A + 0,16L_{i,t}^B) \quad (38)$$

Принимается, что при осеннем перемешивании вода насыщается кислородом до 100%. Поэтому для начала шагов, соответствующих началу гидрологической зимы, содержание кислорода будет

$$C_{i,t} = 13,2; \quad (t = 12, 36, 60, 84, 108) \quad (39)$$

Для других периодов зимы

$$C_{i,t} = F_{i,t-1} \frac{V_{i,t}^0}{V_{i,t}} + F_{i-1,t-1} \frac{W_{i,t}}{V_{i,t}} \quad (40)$$

Содержание кислорода в конце шага —

$$F_{i,t} = C_{i,t} - M_{i,t} \quad (41)$$

Разрушение органического вещества

$$D_{i,t} = 0,08L_{i,t}^A + 0,16L_{i,t}^B \quad (42)$$

Величина ПО меняется соответственно распаду аллохтонного органического вещества

$$R_{i,t} = 0,92 \left( R_{i,t-1} \frac{V_{i,t}^0}{V_{i,t}} + R_{i-1,t-1} \frac{W_{i,t}}{V_{i,t}} \right) \quad (43)$$

Цветность рассчитывается в соответствии с уравнением (34)

$$C_{i,t} = 40 + 3,75(R_{i,t} - D_{i,t}) \quad (44)$$

#### Обоснование параметров модели

Для расчетов водохранилище было разделено на 6 морфоучастков (рис. 1). Деление было проведено по морфометриче-



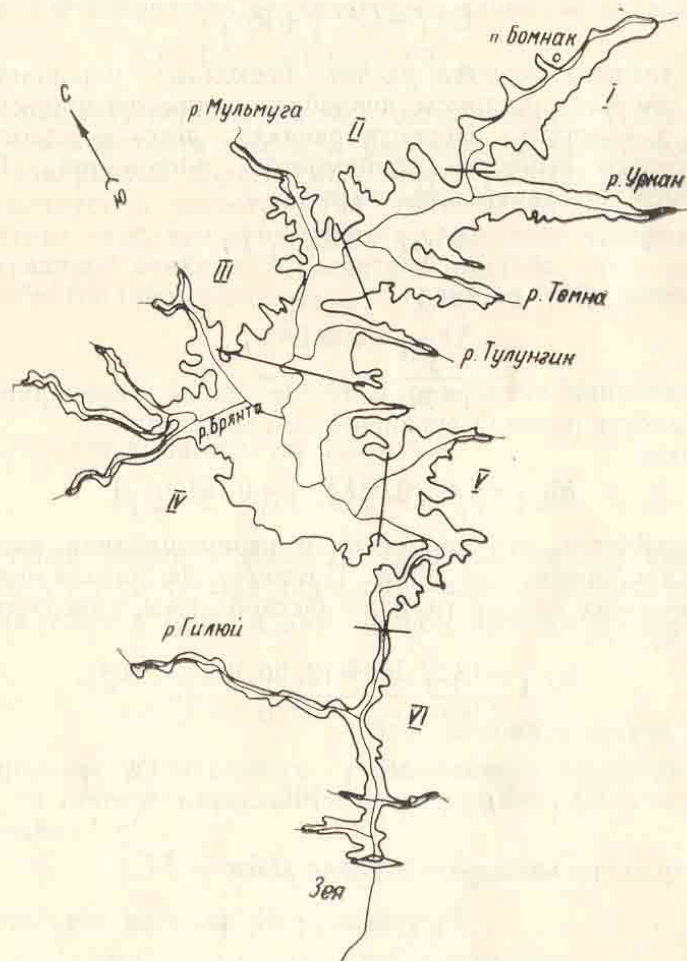


Рис. 1. Схема Зейского водохранилища

ским показателям. Верхний I участок — наиболее мелководный и узкий. Он начинается от зоны выклинивания подпора водохранилища и заканчивается сужением выше устья р. Урман. II участок представляет собой плес, простирающийся до устья р. Мультуги. На III участке в водохранилище впадает только одна, относительно крупная р. Мультуга и от IV участка он отличается гораздо меньшими глубинами и шириной. IV участок водохранилища имеет наиболее озерный характер, хотя на нем также впадает только одна крупная река Брянта. V морфоучасток расположен в предгорьях хребтов Тукурингра и Соктахан. На этом участке водохранилище практически не получает ни одного крупного притока. И, наконец, VI участок — суженная часть водохранилища с резким падением уклонов, с максимальными для водохранилища глубинами

и, по-видимому, с наименьшей эрозией берегов после создания водохранилища. На этом участке впадает один из самых крупных притоков Зей — р. Гиллюй.

В качестве временного расчетного шага ( $t$ ) принят период 15 сут., т. е. каждый год включает 24 шага. I шаг отнесен ко 2-й половине мая, т. е. к началу гидрологического лета, когда в водохранилище можно ожидать появления термической стратификации. 24-й, последний шаг, относится к первой половине мая. Расчет был проведен для 3 лет различной водности: маловодного 1913 г. (обеспеченность — 85%, по гидропосту «Зейские ворота» за 50%), среднего по водности года (обеспеченность которого принята за 50%) и многоводного 1966 г. (обеспеченность 20%).

Поскольку водный сток основных притоков Зейского водохранилища освещен не полно, а для 1913 г. вообще не освещен, пришлось прибегнуть к косвенным методам расчета расхода рек. В этом случае коэффициент вариации рассчитывается по формуле («Ресурсы поверхностных...», 1966)

$$C_{V\text{год.}} = \frac{A}{q^{-0.5} F^{0.1}}, \quad (45)$$

где  $C_{V\text{год.}}$  — годовой коэффициент вариации,  $A$  — коэффициент, величина которого определяется рядом природных факторов,  $q$  — норма годового стока, л/с,  $F$  — площадь водосбора, км<sup>2</sup>.

Коэффициент подбирался по карте, приведенной в работе «Ресурсы поверхностных...» (1966) (рис. 56). Отношение бралось равным 2. Для малых водосборов площадью  $\leq 400$  км<sup>2</sup>  $C_v$  подбирался по рис. 58а той же работы. Модули годового стока определялись по рис. 52 («Ресурсы поверхностных...», 1966) или брались по аналогии со сходными водосборами. Коэффициенты вариации осенне-зимнего стока рассчитывались по районному отношению этого показателя к годовому коэффициенту вариации (табл. 74), а доля осенне-зимнего и зимнего стока определялась из табл. 75 в той же работе (табл. 1).

При отсутствии данных обеспеченность стока по отдельным месяцам принималась равной обеспеченности по створу «Зейские ворота» или по реке-аналогу. Для среднего по водности года обеспеченность по всем месяцам принималась за 50%. Разница между суммарным стоком всех рек и стоком через гидроствор «Зейские ворота» рассматривалась как боковая приточность и распределялась по участкам пропорционально длине их береговой линии при отметке 315 м (табл. 2).

При отсутствии соответствующих материалов в «Гидрологических ежегодниках» внутримесячное распределение стока проводилось с помощью таблицы случайных чисел. При этом принималось, что асимметрия стока между смежными 15 сут. не может превышать 5:1. Большой сток считался смежным с



Таблица 1

## Некоторые параметры основных притоков Зейского водохранилища

| № участка | Река, створ                   | Площадь водосбора, км <sup>2</sup> | % заболоченности | C <sub>в</sub> годовой | Осенний зимний сток, % от годового | Зимний сток, % от годового | Модуль стока, л/(с·км <sup>2</sup> ) |
|-----------|-------------------------------|------------------------------------|------------------|------------------------|------------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| I         | Зей, пос. Бомлак              | 28 200                             | 18               | 0,32                   | 77,5                               | 0,7                        | 10,80                                |
| II        | Бомлак, пос. Бомлак           | 491                                | 10               | 0,34                   | 3,0                                | 0,0                        | 9,82                                 |
|           | Уркан (левый), 19 км от устья | 3 740                              | 49               | 0,38*                  | 4,5                                | 0,0                        | 3,58                                 |
|           | Мульмугакан, устье            | 1 360                              | 16               | 0,42*                  | 4,0                                | 0,0                        | 9,10*                                |
|           | Тамна, устье                  | 1 390                              | 18               | 0,63*                  | 4,0                                | 0,0                        | 4,00*                                |
| III       | Мульмуга, устье               | 3 360                              | 11               | 0,41*                  | 3,5                                | 0,2                        | 7,90*                                |
|           | Тундунгин, устье              | 466                                | 32               | 0,50*                  | 3,0                                | 0,0                        | 3,00*                                |
| IV        | Бряга, с. Бряга               | 14 100                             | 17               | 0,38                   | 7,0                                | 0,5                        | 8,21                                 |
| V         | Гильой, у перовоза            | 22 500                             | 9                | 0,35                   | 7,5                                | 0,6                        | 8,29                                 |

\* Рассчитаны в величинах.

более водным месяцем. Для 1966 г. по материалам «Гидрологического ежегодника» (1966) разделение объема водного стока для рек, не охваченных наблюдениями, велось или по материалам гидроствора «Зейские ворота» или по рекам-аналогам. Уровни водохранилища были рассчитаны ленинградским отделением Гидропроекта («Зейский комплексный...», 1967) для ряда лет с 1905 по 1967 г. Площади отдельных морфоучастков определялись путем планиметрирования (табл. 3).

Таблица 2

Длина береговой линии отдельных морфоучастков при отметке уровня 315

|                           | Участки |      |      |      |      |      |
|---------------------------|---------|------|------|------|------|------|
|                           | I       | II   | III  | IV   | V    | VI   |
| Длина береговой линии, км | 110     | 220  | 150  | 160  | 140  | 250  |
| % от общей длины          | 10,7    | 21,3 | 14,6 | 15,6 | 13,6 | 24,2 |

Таблица 3

Площади отдельных морфоучастков водохранилища при разных отметках уровня, м<sup>2</sup>·10<sup>6</sup>

| Отметка уровня, выс. над ур. м., м | Участки |       |       |       |       |       | Сумма  |
|------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
|                                    | I       | II    | III   | IV    | V     | VI    |        |
| 320                                | 274,4   | 596,6 | 499,9 | 840,0 | 241,9 | 131,5 | 2533,6 |
| 315                                | 256,0   | 555,6 | 466,4 | 783,6 | 225,7 | 122,7 | 2410,0 |
| 310                                | 159,2   | 443,8 | 404,9 | 735,5 | 209,4 | 67,3  | 2020,1 |
| 305                                | 145,2   | 375,8 | 385,7 | 712,5 | 202,6 | 39,1  | 1860,9 |
| 300                                | 130,4   | 307,6 | 363,2 | 684,3 | 194,4 | 24,6  | 1704,5 |
| 295                                | 119,1   | 224,3 | 342,3 | 662,0 | 181,0 | 16,9  | 1546,5 |
| 290                                | 0       | 150,0 | 301,0 | 626,4 | 166,6 | 11,8  | 1255,8 |
| 285                                | 0       | 0     | 279,6 | 590,2 | 155,3 | 9,3   | 1034,4 |
| 280                                | 0       | 0     | 249,3 | 563,3 | 144,4 | 8,3   | 965,3  |
| 275                                | 0       | 0     | 191,7 | 507,9 | 133,6 | 7,4   | 840,6  |
| 270                                | 0       | 0     | 63,7  | 401,4 | 122,0 | 6,8   | 593,9  |
| 265                                | 0       | 0     | 0     | 326,9 | 114,1 | 6,2   | 447,2  |
| 260                                | 0       | 0     | 0     | 197,6 | 102,5 | 6,0   | 306,1  |
| 255                                | 0       | 0     | 0     | 0     | 75,6  | 5,3   | 80,9   |
| 250                                | 0       | 0     | 0     | 0     | 0     | 4,9   | 4,9    |

Следует отметить, что суммарные площади морфоучастков практически совпали с расчетами, сделанными ленинградским отделением Гидропроекта («Зейский комплексный...», 1967).

Рассмотрение процентного отношения площадей, ограниченных определенными изобатами, показало, что объемные функции морфоучастков подчиняются эллипсоидальной или параболической зависимости (Хомские, 1969), хотя в некоторых случаях и образованы сложением двух фигур. В зависимости от



характера объемной функции объема морфоучастков рассчитывались по первой и второй формуле. Только объем VI морфоучастка определялся по формуле усеченной призмы. Результаты расчетов приведены в табл. 4. И в этом случае наши расчеты для всего волохранилища хорошо совпадают с данными Ленгидропроекта.

Таблица 4

Объемы воды в отдельных морфоучастках,  $\text{м}^3 \cdot 10^6$

| Отметки<br>уровня,<br>выс. над<br>ур. м., м | Участки |        |        |        |      |      | Сумма  |
|---------------------------------------------|---------|--------|--------|--------|------|------|--------|
|                                             | I       | I      | III    | IV     | V    | VI   |        |
| 320                                         | 4670    | 11 100 | 16 250 | 38 970 | 8400 | 1360 | 80 750 |
| 315                                         | 3410    | 8 120  | 13 550 | 34 520 | 7510 | 1230 | 68 450 |
| 310                                         | 2430    | 5 630  | 11 250 | 30 170 | 6640 | 1100 | 57 220 |
| 305                                         | 1550    | 3 570  | 8 970  | 25 910 | 5800 | 970  | 46 770 |
| 300                                         | 750     | 2 020  | 6 860  | 21 730 | 5010 | 840  | 37 210 |
| 295                                         | 500     | 980    | 4 980  | 17 770 | 4280 | 750  | 28 810 |
| 290                                         | 0       | 300    | 3 290  | 14 000 | 3590 | 660  | 21 840 |
| 285                                         | 0       | 0      | 1 860  | 10 420 | 2940 | 570  | 15 790 |
| 280                                         | 0       | 0      | 730    | 7 180  | 2330 | 480  | 10 720 |
| 275                                         | 0       | 0      | 200    | 4 430  | 1750 | 390  | 6 770  |
| 270                                         | 0       | 0      | 30     | 2 290  | 1300 | 300  | 3 920  |
| 265                                         | 0       | 0      | 0      | 950    | 700  | 210  | 1 860  |
| 260                                         | 0       | 0      | 0      | 96     | 330  | 160  | 586    |
| 255                                         | 0       | 0      | 0      | 0      | 150  | 110  | 260    |
| 250                                         | 0       | 0      | 0      | 0      | 0    | 60   | 60     |

Поскольку Зейское водохранилище является термически глубоким, то в модели пришлось учесть глубину термоклина, препятствующего поступлению биогенных элементов из гипolimниона в слой активного фотосинтеза (уравнение 9). Действительно, при коэффициенте турбулентной диффузии, достигающей для больших озер десятков  $\text{мг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$  и столь больших градиентов концентраций, как  $\text{мкг}/\text{см}$ , перенос вещества через слой термоклина будет выражаться всего десятыми долями  $\text{г}/\text{м}^3$ . Поэтому подобной величиной можно пренебречь и рассматривать эпилимнион как практически изолированное от нижних слоев водное тело. По аналогии с Братским водохранилищем (Росинский, 1975; Бояринов, 1973) мощность эпилимниона (ЕР, м) можно выразить следующими величинами: нулевому шагу соответствует 0,1—15, 2—5, 3—6, 4—7, 5—8, 6—9, 7—10, 8—12, 9—14, 10—16, 11—18, 12—20, 13—0.

Следующей величиной, требующей обоснования, является концентрация органического вещества в воде притоков. Нам указывалось ранее, что корреляция между водным стоком и концентрацией органического вещества сдвинута во времени (Лебедев и др., 1977). Однако, если проводить осреднение во времени с периодом в 15 сут, то водный сток и величина пер-

манганатной окисляемости оказываются тесно связанными между собой прямолинейной зависимостью (рис. 2).

Можно принять, что содержание органического вещества имеет ту же обеспеченность, что и водный сток. Однако содержание органического вещества в речной воде тесно коррелирует и с заболоченностью водосбора (рис. 3). Поэтому, кро-

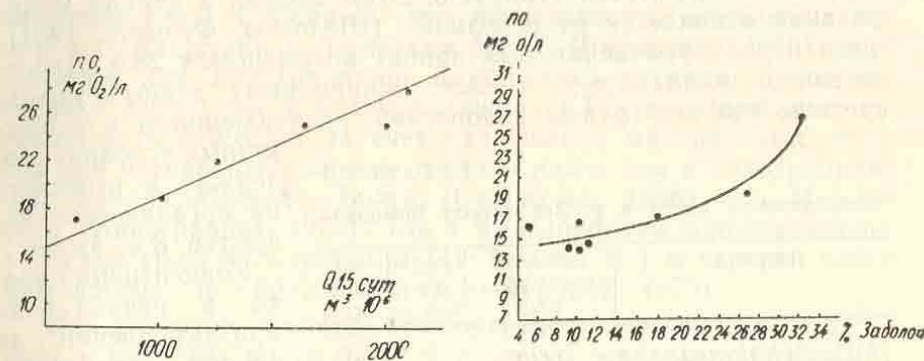


Рис. 2. Связь между средней величиной водного стока (Q) и величиной перманганатной окисляемости (ПО) в р. Зее (створ Бомнак)

Рис. 3. Связь между заболоченностью водосборов и перманганатной окисляемостью воды

ме учета обеспеченности расхода воды, необходимо вводить поправку и на заболоченность. С учетом такой поправки (табл. 1) была рассчитана концентрация ПО в целом для рек каждого отдельного морфоучастка и приведенный рисунок (рис. 4) является типичным для всех участков реки. На основании приведенных расчетов в уравнение (13) были введены коэффи-

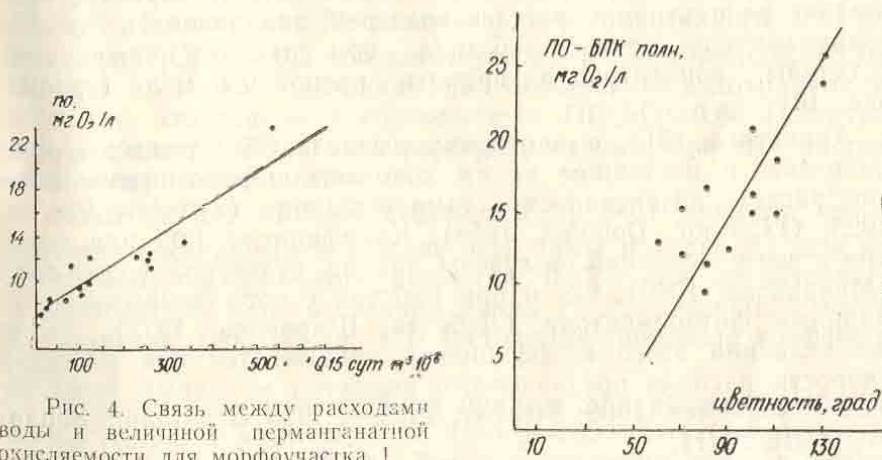
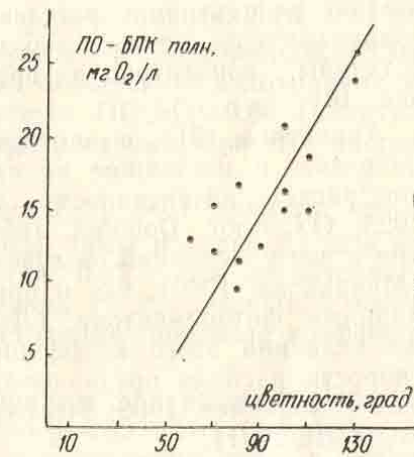


Рис. 4. Связь между расходами воды и величиной перманганатной окисляемости для морфоучастка I

Рис. 5. Связь между цветностью воды, величиной перманганатной окисляемости и БПК<sub>полн</sub>.





коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$ . Для I участка они равны 19,6 и 0,019; для II — 45,4 и 0,224; для III — 17,4 и 0,182; для IV — 14,8 и 0,048; для V — 45,4 и 0,224; для VI — 12,8 и 0,017.

Коэффициенты в уравнениях (16) и (17) выбраны на основании работ (Лебедев, 1972; Скопинцев, 1966). Коэффициент из уравнения (17) вошел также и в систему (24) в виде обратной зависимости 100/8-12,5. Этим модель в данной модификации отличается от исходной (Шеломов, Федосов, 1961), где в первом уравнении был принят коэффициент 28,6. Действительно, по-видимому, в свете современных данных можно считать, что все группы водорослей, развивающиеся в есте-

Таблица 5

Концентрация азота в р. Зее (створ Бомнак)

| Период          | Средний расход воды, м <sup>3</sup> /с | Средняя концентрация азота, мг/л |
|-----------------|----------------------------------------|----------------------------------|
| 15—31.VII 1974  | 1447                                   | 0,57                             |
| 1—17.VIII 1974  | 2144                                   | 0,57                             |
| 19—30.VII 1975  | 1825                                   | 0,56                             |
| 1—15.VIII 1975  | 1250                                   | 0,58                             |
| 16—30.VIII 1975 | 1112                                   | 0,57                             |
| 1—15.IX 1975    | 768                                    | 0,40                             |
| 16—19.IX 1975   | 300                                    | 0,37                             |

Примечание. Исходные данные, положенные в основу таблицы, приведены в работах (Лебедев, 1972; Лебедев и др., 1977).

ственного уровня, но также непосредственно не коррелирует с водным стоком (расход на створе «Зейские ворота» —  $1800 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup> за 15 сут). Поэтому при расходе более  $1800 \cdot 10^6$  м<sup>3</sup> принято, что средняя концентрация азота в воде рек, впадающих в Зейское водохранилище, равна 0,6 мг/л, при расходе ниже этой величины, концентрация принята равной 0,4 мг/л (уравнение 19).

Уравнение (21), по которому вычисляется температурная поправка, в настоящее время довольно широко применяется при расчете интенсивности самоочищения (Streeter, Phelps, 1925; O'Connor, Dobbins, 1958). Коэффициент 1,05 или близкие к нему величины получены как на культурах водорослей (Микрякова, 1966), так и при работах с естественными популяциями фитопланктона (Лебедев, Широкова, 1972). Такая же величина этого коэффициента принимается при расчетах скорости распада органического вещества в водных экосистемах (Скопинцев, 1966; Streeter, Phelps, 1925; Grantham, Schaake, Pyatt, 1971).

Метка  $EP_i = 0$  или  $EP_i > 0$  в системах (20) и (23—24), определяющая просчет по альтернативным циклам, выбрана по

чисто формальным соображениям для удобства организации машинной программы, поскольку для летних месяцев  $EP_i$  всегда  $> 0$ , а для зимних всегда 0. Разумеется, моменты перехода от цикла к циклу логичнее было обозначить номерами шагов.

Для установления величины осадконакопления и содержания в донных отложениях органического вещества (уравнение системы 24) подобрать аналог практически невозможно. Тем не менее следует ожидать, что интенсивность осадконакопления в соответствии с расчетами В. М. Широкова (1975), сделанными для водохранилищ Енисейского каскада, будет несколько выше, чем в водохранилищах ЕТС, а содержание органического вещества за счет разрушения минеральных грунтов при переработке берегов гораздо ниже, чем в водохранилищах канала Москва—Волга (Старикова, 1956) или Можайском (Виноградова, 1975). Так в Красноярском водохранилище в первые годы эксплуатации (1967—1969 гг.) в верхней части илы вообще не образовывались (Широков, 1975).

Для расчетов принято, что содержание органического углерода в илах ( $\beta$ ) равно 0,4%, а скорость осадконакопления ( $\delta$ ) в I морфоучастке — 0,01 м/г, во II, III, IV морфоучастках — 0,0075 м/г, в V морфоучастке — 0,005 м/г. Для VI морфоучастка следует ожидать как очень слабой абразии берегов в связи с выходом коренных пород и малой длиной разгона волны, так и слабого накопления органического вещества, обусловленного глубоководностью. Поэтому для VI морфоучастка  $\beta$  принято равным 0,2%, а  $\delta$  — 0,0025 м/г. Чтобы не усложнять модель вычислением  $BPK_{полн}$ , была проанализирована зависимость, представленная на рис. 5. Оказалось, что  $BPK_{полн}$  может быть без ошибки заменено  $BPK_{8,15}$  ( $DA_{i,1}$  — в модели). Эта величина и была введена в регрессионное уравнение (34). При расчете величины перманганатной окисляемости ( $R_{i,t}$ ) (уравнение 28) первоначально принималось, что отношению ПО/БО=0,5 соответствует  $k=0,1$  (Скопинцев, 1950). Однако проверка, сделанная на Можайском водохранилище, показала, что такому  $k$  соответствует ПО/БО=0,65 (Айзатуллин, Лебедев, 1977). Такой коэффициент был принят в настоящей модификации модели.

Наконец, для зимних месяцев ( $P_{i,t} = 0$ ) принято, что  $K$  остается постоянным в течение всей зимы и равно 0,1 для автохтонного органического вещества, 0,05 — для аллохтонного, а температура воды в среднем равна 3°. Это позволило ввести в уравнения (36, 37, 38, 42) постоянные линейные коэффициенты.

В таком виде модель была принята для расчетов. Просчет велся на ЭВМ «Минск-22М». Программа была написана на алгамсе (усеченный алгол). Время трансляции, счета и выдачи результатов на ЦПУ — около 50 минут.



## Результаты расчетов и их обсуждение

При проведении расчетов на ЭВМ первоначально были заданы некоторые исходные произвольные параметры и для того, чтобы привести водохранилище в стабильное состояние, они предварительно просчитывались 2 года, которые во внимание не принимались. Затем начинался собственно счет. По чисто техническим соображениям расчет велся в следующем по-

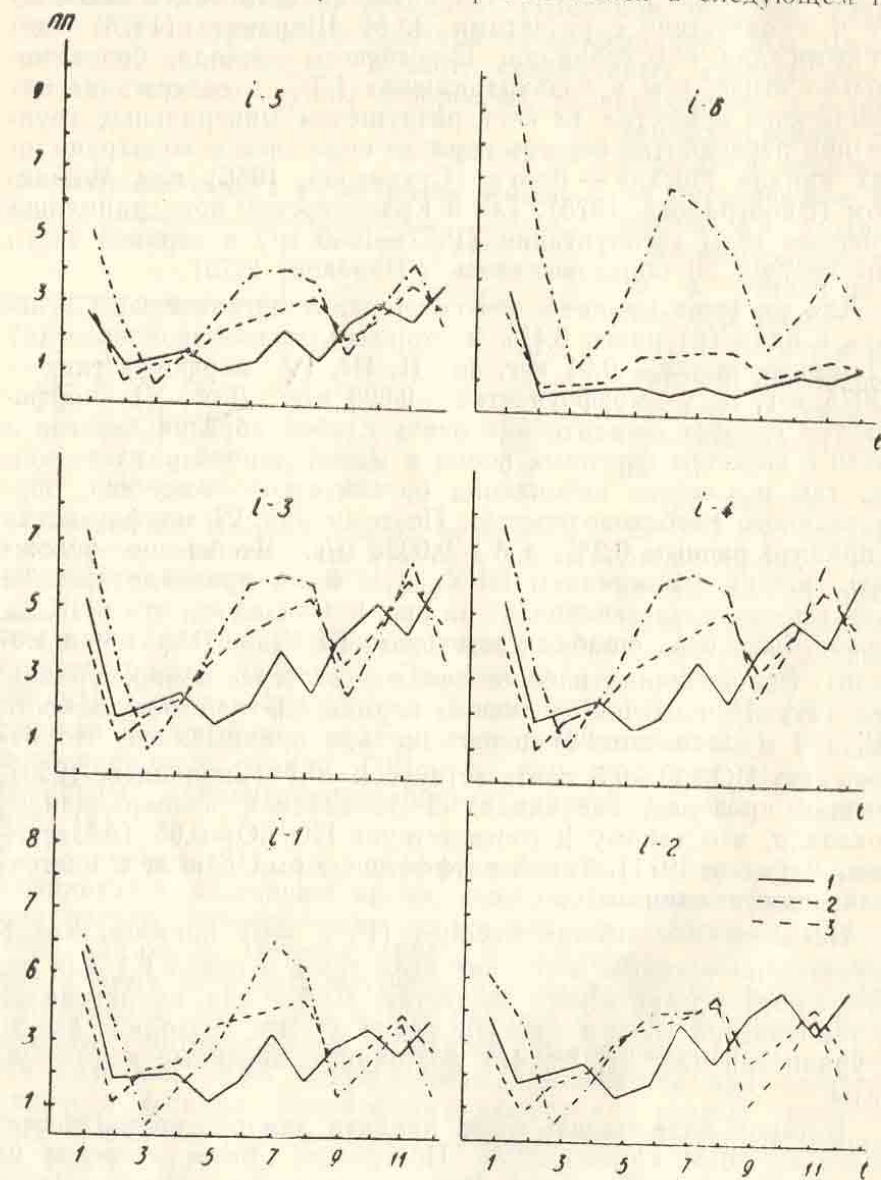


Рис. 6. Первичная продукция, г/(м²·сут): 1 — многоводный год, 2 — средний по водности год, 3 — маловодный год

рядке: многоводный год — средний по водности год — маловодный год. Результаты приведены на рис 6—9, осредненные показатели в табл. 6.

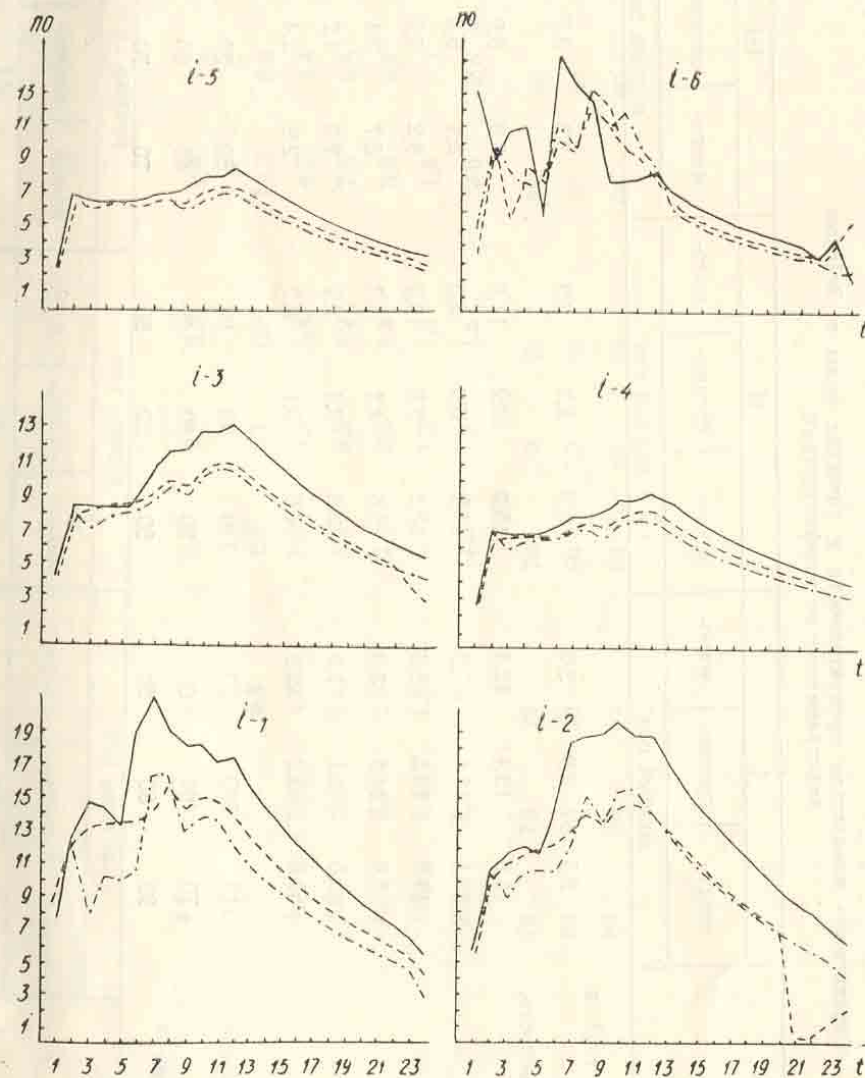


Рис. 7. Перманганатная окисляемость воды, мг·О/л. (Обозначения те же, что и на рис. 6)

По величине первичной продукции Зейское водохранилище может быть отнесено к мезотрофному типу. Причем в маловодные годы фотосинтез планктона на всех участках выше, за исключением участка II, где он оказывается наименьшим (табл. 7).

Наиболее продуктивными будут воды III участка, хотя в ма-



Таблица 6

## Осредненные показатели продуктивности и качества воды в Зейском водохранилище по морфоучасткам

| Показатель                                             | I          |         |       | II         |         |       | III        |         |       |
|--------------------------------------------------------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|
|                                                        | много-     | средне- | мало- | много-     | средне- | мало- | много-     | средне- | мало- |
|                                                        | водный год |         |       | водный год |         |       | водный год |         |       |
| Первичная продукция, г/м <sup>2</sup> в сутки          | 2,5        | 2,9     | 3,0   | 3,0        | 2,9     | 2,9   | 3,3        | 3,7     | 4,2   |
| Перманганатная окисляемость, мг О <sub>2</sub> /л лето | 15,9       | 13,4    | 12,3  | 15,0       | 12,2    | 11,8  | 9,9        | 8,9     | 8,4   |
| зима                                                   | 10,1       | 8,1     | 7,0   | 11,2       | 6,9     | 8,3   | 8,4        | 6,5     | 6,5   |
| Сред. за год                                           | 13,0       | 10,5    | 9,6   | 13,1       | 9,6     | 10,0  | 9,2        | 7,7     | 7,5   |
| БПК, мг О <sub>2</sub> /л лето                         | 5,0        | 4,5     | 3,9   | 5,5        | 4,1     | 4,2   | 3,7        | 3,1     | 3,2   |
| зима                                                   | 2,5        | 2,1     | 1,9   | 2,6        | 2,1     | 2,2   | 2,0        | 1,7     | 1,7   |
| Сред. за год                                           | 3,8        | 3,2     | 2,9   | 4,0        | 3,1     | 3,2   | 2,9        | 2,4     | 2,5   |
| Цветность, град. лето                                  | 110        | 100     | 90    | 110        | 90      | 90    | 80         | 80      | 80    |
| зима                                                   | 70         | 60      | 60    | 70         | 60      | 60    | 60         | 60      | 60    |
| Сред. за год                                           | 90         | 80      | 80    | 90         | 80      | 80    | 70         | 70      | 70    |

| Показатель                                             | IV         |         |       | V          |         |       | VI         |         |       |
|--------------------------------------------------------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|------------|---------|-------|
|                                                        | много-     | средне- | мало- | много-     | средне- | мало- | много-     | средне- | мало- |
|                                                        | водный год |         |       | водный год |         |       | водный год |         |       |
| Первичная продукция, г/м <sup>2</sup> в сутки          | 3,1        | 5,5     | 4,3   | 2,0        | 2,2     | 2,8   | 0,8        | 1,2     | 4,1   |
| Перманганатная окисляемость, мг О <sub>2</sub> /л лето | 7,3        | 6,2     | 6,5   | 6,6        | 6,1     | 6,2   | 10,3       | 8,9     | 9,4   |
| зима                                                   | 5,8        | 5,0     | 4,7   | 5,2        | 4,5     | 4,4   | 4,7        | 4,4     | 3,9   |
| Сред. за год                                           | 6,6        | 5,6     | 5,6   | 5,9        | 5,3     | 5,2   | 7,5        | 6,6     | 6,6   |
| БПК, мг О <sub>2</sub> /л лето                         | 2,5        | 2,5     | 2,5   | 2,4        | 2,3     | 2,3   | 3,8        | 3,7     | 4,2   |
| зима                                                   | 1,5        | 1,4     | 1,3   | 1,4        | 1,3     | 1,3   | 1,5        | 1,3     | 1,2   |
| Сред. за год                                           | 2,0        | 2,0     | 1,9   | 1,9        | 1,8     | 1,8   | 2,6        | 2,5     | 3,0   |
| Цветность, град. лето                                  | 70         | 70      | 70    | 70         | 70      | 70    | 80         | 80      | 80    |
| зима                                                   | 60         | 50      | 50    | 50         | 50      | 50    | 50         | 50      | 50    |
| Сред. за год                                           | 60         | 60      | 60    | 60         | 60      | 60    | 60         | 60      | 60    |



Таблица 7

Величина перманганатной окисляемости, БПК<sub>5</sub> и цветности в воде р. Зей до и после зарегулирования в летний период

| Показатель                                        | Бытовой режим | После зарегулирования |
|---------------------------------------------------|---------------|-----------------------|
| Перманганатная окисляемость, мг О <sub>2</sub> /л | 12,9—36,1     | 1,9—21,0              |
| БПК <sub>5</sub> , мг О <sub>2</sub> /л           | 0,2—2,6       | 0,6—9,2               |
| Цветность, град.                                  | 60—130        | 50—120                |

продуктивность составляет около 60 кг/га. Однако такая величина вряд ли может быть достигнута в Зейском водохранилище. Во-первых, из-за больших размеров водохранилища оптимальный контроль возрастного состава стада невозможен. Во-вторых, колебания уровня будут препятствовать нересту рыб, размножающихся на литорали. А эти рыбы, по-видимому, должны составить основную долю ихтиомассы даже при направленной реконструкции ихтиофауны. В-третьих, не произведена предварительная очистка тоней. В-четвертых, резкая термическая стратификация летом и возможный дефицит кислорода зимой окажут на стадо рыб значительное отрицательное влияние. Поэтому можно предположить, что вылов не превысит 4 кг/га, хотя кормовая база позволяет получить и большую рыбопродукцию.

Перманганатная окисляемость воды будет значительной. В многоводные годы в верхних участках водохранилища она будет доходить до 13—15 мг О<sub>2</sub>/л. Причем в отдельные периоды ПО может достигать на I морфоучастке 20 мг О<sub>2</sub>/л (август).

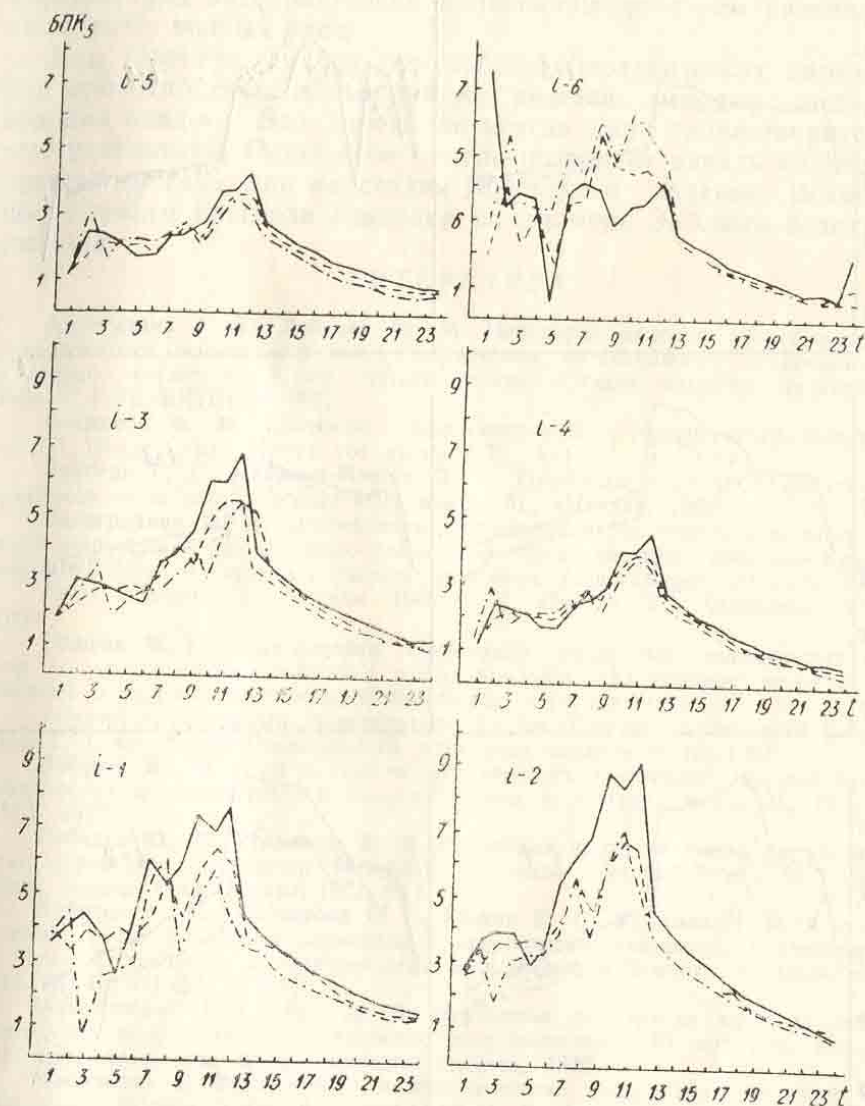
БПК<sub>5</sub> будет также выше в многоводные годы, хотя на VI морфоучастке должна отмечаться обратная картина. В целом БПК<sub>5</sub> будет находиться в допустимых для водохранилища пределах.

Цветность воды по сравнению с другими водохранилищами несколько повышена. Наибольшие ее значения будут наблюдаться в многоводные годы в верхней части водохранилища. Впрочем, цветность незначительно связана с водностью года.

В целом следует отметить, что сезонный ход показателей продуктивности и качества воды в водохранилищах, рассчитанный на модели, вполне совпадает с картиной в реальных водных экосистемах.

ловодный год фотосинтез планктона на IV морфоучастке будет достигать вообще наивысшего среднесезонного значения — 4,29 мг/м<sup>3</sup>·(сут). В целом можно считать, что первичная продукция Зейского водохранилища близка к 3 г/м<sup>2</sup>·сут.

Если принять, что продукция рыбы равна в среднем 0,2% от величины первичной продукции (Винберг, 1966), калорийность фитопланктона — 5,6 ккал/г, а рыбы — 1 ккал/г сырого вещества, можно рассчитать, что рыбо-

Рис. 8. БПК<sub>5</sub>, мг·О<sub>2</sub>/л. (Обозначения те же)

Если сравнить рассчитанные показатели качества воды в водохранилище с таковыми в реке при бытовом режиме, то оказывается, что перманганатная окисляемость после зарегулирования несколько понизится вследствие меньшего удельного значения аллохтонных органических веществ, БПК<sub>5</sub> повысится из-за усиления процессов синтеза органического вещества, а цветность останется на прежнем уровне (табл. 8).

Таким образом, создание водохранилища существенно не изменит качество воды.



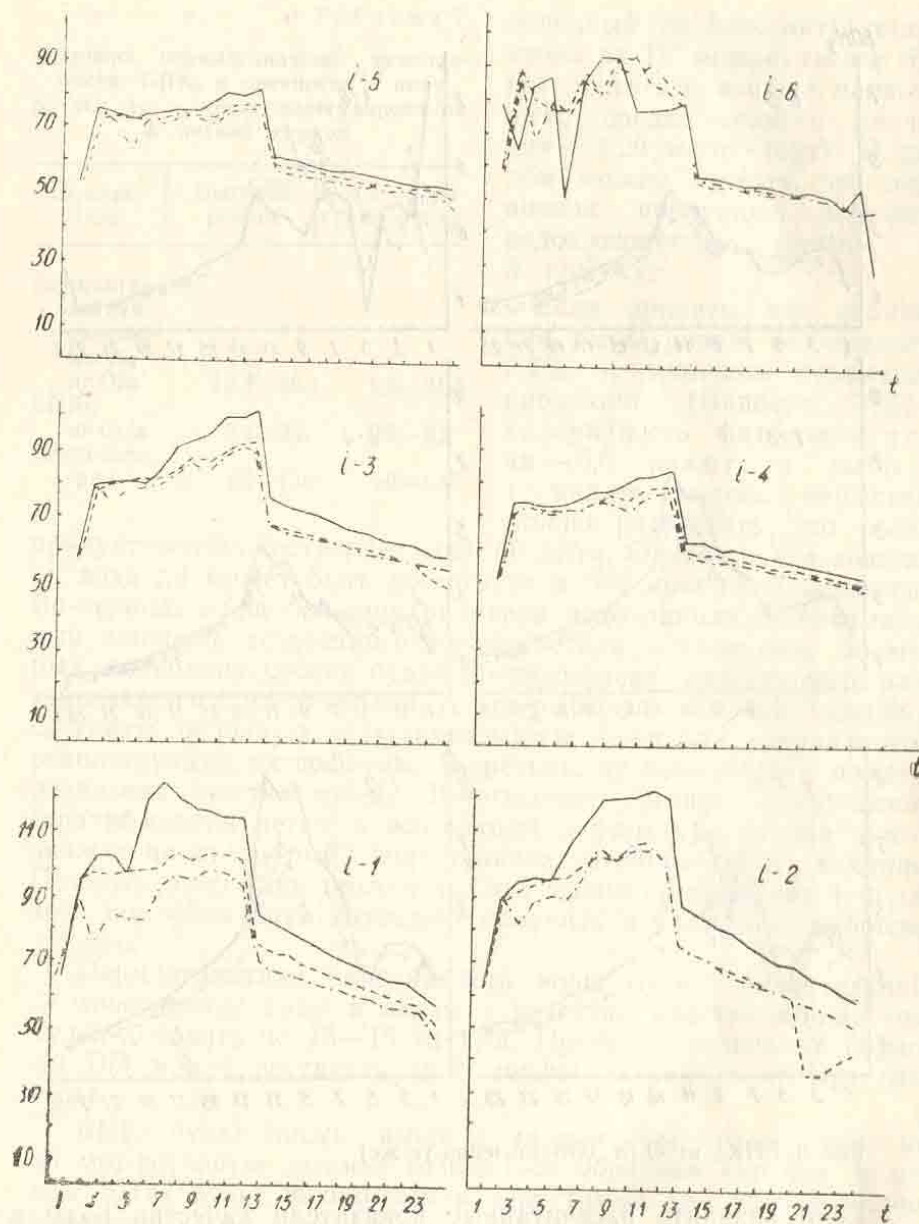


Рис. 9. Цветность, градусы. (Обозначения те же)

### Заключение

Предложенная модель для расчета продуктивности и основных параметров качества воды основана на учете поступления в чашу будущего водохранилища соединений азота и аллохтонного органического вещества. При расчетах учитывается

морфометрия водохранилища и перемещение в нем различных по генезису водных масс.

Как известно, до сих пор прогноз биологических параметров проектируемых водохранилищ ведется методом подбора водоема-аналога. Это далеко не всегда дает удовлетворительные результаты. Описанная модель позволяет давать количественный прогноз еще на стадии проектного задания. Возможность такого прогноза показана на примере Зейского водохранилища.

### ЛИТЕРАТУРА

- Айзатуллин Т. А., Лебедев Ю. М. Некоторые аспекты трансформации органического вещества в связи с расчетом интенсивности самоочищения в водных экосистемах. — Сер. «Итоги науки», «Общая экология, биоценология», т. 4. М., ВИНТИ, 1977.
- Бояринов В. М. Братское водохранилище (физико-географический очерк). Иркутск, изд. Иркут. гос. ун-та, 1973.
- Винберг Г. Г., Кобленц-Мишке О. И. Проблемы первичной продукции водоемов. — Экология водных организмов. М., «Наука», 1966.
- Виноградова Н. Н. Особенности формирования и накопления взвешенного вещества в малых водохранилищах Москворецкой системы. — Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск, «Наука», 1975.
- Гидрологический ежегодник. 1966, т. 9; 1967, т. 9. Хабаровск, 1968, 1969.
- Ершова М. Г. Опыт расчета содержания различных генетических типов вод в отдельных участках водохранилища. — Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск, «Наука», 1975.
- Зейский комплексный гидроузел на р. Зее. Вариант с бетонной плотинкой. Т. 1, кн. 2, ЛО Гидропроекта, проектное задание Ф 12, 1967.
- Лебедев Ю. М. Азот в сестоне автохтонного генезиса. — Вопросы взаимодействия поверхностных и подземных вод и качества воды. М., Изд-во МГУ, 1972.
- Лебедев Ю. М., Широкова Е. Л. Некоторые факторы среды, определяющие первичную продукцию Можайского водохранилища. — «Научн. докл. высш. школы. Биол. науки», 1972, № 6.
- Лебедев Ю. М., Каспарова С. Г., Кашин Н. П., Кукулина Н. М. Формирование стока биогенных элементов и органического вещества в верховьях р. Зея. — Гидрохимия и гидрогеология юга Дальнего Востока. Владивосток, изд. ДВНЦ АН СССР, 1977.
- Майстренко Ю. Г., Гак Д. В. Некоторые показатели качества воды Киевского водохранилища. — Киевское водохранилище. Гидрохимия, биология, продуктивность. Киев, «Наукова думка», 1972.
- Микрякова Т. Ф. Действие и последствие температуры на скорость дыхания *Chlorella vulgaris*. — Труды ин-та биол. внутр. вод АН СССР, в. 19 (22), 1966.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Дальний Восток. Верхний и средний Амур (от истоков до с. Помпеевка). Под ред. А. П. Муранова. Л., Гидрометеониздат, 1966.
- Росинский К. И. Термический режим водохранилищ. М., «Наука», 1975.
- Скопинцев Б. А. Соотношение между кислородом окисляемости, органическим углеродом и общим содержанием органического вещества в природных водах. — «Гидрохимические материалы», 1950, № 18.
- Скопинцев Б. А., Бакулина Л. Г. Органическое вещество в водах Рыбинского водохранилища. — Труды ин-та биол. внутр. вод АН СССР. М. — Л., «Наука», 1966, 13 (16).
- Старикова Н. Д. Накопление и распределение осадков в некоторых водохранилищах канала им. Москвы. — ДАН СССР, 1956, т. 106, № 6.



Топачевский А. В., Сиренко Л. А., Цееб Я. Я. Антропогенное евтрофирование водохранилищ, «цветение» воды и методы его регулирования.— «Водные ресурсы», 1975, № 1.

Хомскис В. Динамика и термика малых озер. Вильнюс, «Минтис», 1969.

Цееб Я. Я. Введение.— Гидробиологический режим Днепра в условиях зарегулированного стока. Киев, «Наукова думка», 1967.

Шеломов И. К., Федосов М. В. О круговороте органического вещества в водоемах. Труды АзНИИРХ М., Пищепромиздат, 1961, т. 4.

Широков В. М. Пути становления грунтовых комплексов при создании крупных водохранилищ — Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Новосибирск, «Наука», 1975.

Grantham G. R., Schaake J. C., Pyatt E. E. Water quality simulation model.— J. Sanit. Eng. Div. Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., 1971, 97, N 5.

O'Connor D. J., Dobbins W. E. The measurement and calculation of stream reaeration ratio.— Semin. on Oxygen Relationships in stream, Robert A. Taft Sanit. Engn. Cent. Techn. Rep. W, 1958, 58, N. 2.

Sfreeter H. W., Phelps E. E. A study of the pollution and natural purification of Ohio River.— «Bull. US Publ. Health. Serv.», 1925, N 146.