

06

ИБВВ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ВНУТРЕННИХ ВОД

**ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ  
И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ  
АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ**

АКАДЕМИЯ НАУК СССР  
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ВНУТРЕННИХ ВОД

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ  
И ГИДРОХИМИЧЕСКИЕ  
АСПЕКТЫ ИЗУЧЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ

Труды, вып. 36(39)

34604п

Борок — 1977

Academy of sciences of the USSR  
Institute of biology of inland waters

Hydrological and hydrochemical  
aspects of reservoirs research

Transactions, vol. 36(39)

Главный редактор докт. геогр. наук **Н. В. Буторин**  
Ответственный редактор канд. геогр. наук **Н. А. Зимина**

Borok, 1977

## **Тепловой баланс Иваньковского водохранилища и его изменение в зоне подогрева**

Метод теплового баланса является наиболее совершенным способом определения роли метеорологических и гидрологических факторов в формировании термического режима водоемов. Он позволяет оценить роль каждого приходно-расходного компонента в процессе накопления и расходования тепла водной массой, выявить характер влияния антропогенных источников тепла.

Расчет баланса тепла в Иваньковском водохранилище, принимающем подогретые воды Конаковской ГРЭС, имел целью установить величину естественного прихода и расхода тепла при различных гидрометеорологических условиях, определить количество тепла, поступающего с водами, сбрасываемыми тепловой электростанцией, и его место среди естественных источников тепла, показать изменение температурного режима водоема под влиянием подогретых вод.

Балансы рассчитаны для средних многолетних гидрометеорологических условий — средний расчетный или фоновый баланс — и для ряда лет функционирования Конаковской ГРЭС — 1967—1970, 1972. Период расчета балансов — май—октябрь, методика расчета взята, в основном, из работы [13].

### **Расчет метеорологических и гидрологических характеристик**

На Иваньковском водохранилище и его берегах стационарные метеорологические наблюдения не велись, поэтому соответствующие характеристики воздуха над водоемом рассчитаны по данным наблюдений метеостанций, расположенных на суше. По местоположению метеорологических площадок, их высоте, удаленности от берега, защищенности и другим показателям выбраны метеостанции Калинин и Савелово. Первая расположена в верхней части водохранилища на аэродроме, вторая — в нижнем бьефе на высоком и открытом берегу. Суммарная радиация принята по измерениям на метеорологической станции Торжок, находящейся в 90 км западнее водохранилища. Использование актинометрических данных этой станции для расчета радиационного баланса Иваньковского водохранилища обосновано проведенными полевыми исследованиями [8, 9] и указаниями, имеющимися в [16].

Средняя месячная температура воздуха, его влажность и скорость ветра на высоте 200 см над водой, а также балл общей и ниж-

ней облачности вычислены по методам, изложенным в [1, 4, 12, 13]. Величины метеорологических характеристик воздуха, измеренных на суше [16] и рассчитанных над водой, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Метеорологические характеристики воздуха по наблюдениям на суше (многолетние данные) и рассчитанные для Иваньковского водохранилища**

	V	VI	VII	VIII	IX	X
<b>Скорость ветра, м/с</b>						
Калинин	4,4	3,8	3,6	3,4	4,0	4,5
Савелово	3,1	2,8	2,6	2,6	3,0	3,4
Иваньковское водохранилище	4,3	3,9	3,6	3,6	4,2	4,7
<b>Температура воздуха, °С</b>						
Калинин	10,8	14,9	17,2	15,3	9,8	3,7
Савелово	10,9	15,2	17,5	15,5	10,0	3,8
Иваньковское водохранилище	11,1	16,0	18,4	16,5	11,0	4,7
<b>Влажность воздуха, мб.</b>						
Калинин	8,9	12,8	14,9	14,3	10,4	7,0
Савелово	8,9	12,8	15,0	14,5	10,4	6,9
Иваньковское водохранилище	9,4	13,8	16,0	15,2	10,9	7,2

Многолетние среднесуточные значения альбедо поверхности воды ( $A$ ) на широте Иваньковского водохранилища при различной комбинации общей и нижней облачности для фонового теплового баланса взяты из [1]. Они оказались равными в мае-августе 7, в сентябре 9, в октябре 12% и близкими к средним величинам альбедо Рыбинского водохранилища — соответственно 8, 9 и 12% [16]. Сходство средних значений ( $A$ ) над двумя близлежащими водоемами позволило при расчете тепловых балансов за отдельные годы принять альбедо Иваньковского водохранилища равным альбедо Рыбинского.

Среднемесячная температура поступающих вод определена как средняя взвешенная относительно расходов Волги, Тверцы и рек Шошинского плеса, дающих в сумме около 90% притока в водохранилище. Расход вод из водохранилища осуществляется через Иваньковский гидроузел и канал им. Москвы. Из-за разной глубины водозаборных сооружений температура расходуемых вод различна [15]. Поэтому температура воды, сбрасываемой через ГЭС, принята равной значениям ее в нижнем бьефе у водомерного поста Кимры, а воды, забираемой в канал, — по измерениям в верхнем бьефе у пос-

та Дубна. Средняя температура расходуемых вод получена как средняя взвешенная по величине расходов сооружений. Температура водной массы водохранилища в естественных условиях получена способом, рекомендованным в [17].

### Расчет составляющих теплового баланса

В уравнении теплового баланса радиационный баланс и теплообмен в воде были разложены на составляющие, а само уравнение решено относительно изменения теплосодержания вод:

$$B_k + B_{\pi} - E_{\text{эф}} - LE \pm P - B_c \pm B_r = \pm B_T$$

Здесь  $B_k$  — поглощенная водой солнечная радиация;  $B_{\pi}$  — приток тепла с водами рек;  $E_{\text{эф}}$  — эффективное излучение;  $LE$  — затраты тепла на испарение;  $P$  — теплообмен между водой и атмосферой;  $B_c$  — расход тепла с забранными и сброшенными водами;  $B_r$  — теплообмен с грунтом дна;  $B_T$  — изменение теплосодержания в воде.

Среднемесячные величины  $B_k$  для фонового баланса рассчитаны двумя способами: 1) по месячной сумме радиации и альбедо водной поверхности определялась отраженная радиация; разность между суммарной и отраженной радиациями есть  $B_k$ ; 2) по таблице для определения поглощенной водой суммарной радиации солнца в зависимости от широты места и состояния неба [1]. Величины  $B_k$ , полученные первым и вторым способами, оказались неодинаковы: в первом случае значения  $B_k$  в июне и июле равны, во втором —  $B_k$  в июле на 0,5 ккал/см<sup>2</sup> меньше, чем в июне. Различия значений  $B_k$  в июле по-видимому объясняются тем, что в первом случае для расчета взяты данные наблюдений в конкретном районе, где благодаря особенностям режима облачности суммы радиации в июне и июле равны [16]; во втором случае использованы обобщенные по широте данные, для которых максимум солнечной радиации приходится на июнь. При расчете балансов значения  $B_k$  находились первым способом.

Эффективное излучение ( $E_{\text{эф}}$ ) определено как разность между поглощенной радиацией ( $B_k$ ) и радиационным балансом ( $R$ ). Значения ( $R$ ) вычислены по методике, рекомендованной для случая, когда актинометрические наблюдения над водой отсутствуют и в расчете используются данные наблюдений на суше. Потери тепла на испарение ( $LE$ ) и теплообмен между водой и атмосферой ( $P$ ) также определены по [13].

Приток тепла с водами рек ( $B_{\pi}$ ) и расход его с забранными и сброшенными водами ( $B_c$ ) равны месячному объему поступивших и израсходованных вод (за вычетом вод, возвращенных в водохранилище), умноженному на средневзвешенную температуру этих вод и деленному на среднемесячную площадь зеркала водохранилища (см<sup>2</sup>).

Способ расчета теплообмена воды с грунтом заимствован из [1]: при расчете осередненного баланса величина теплообмена получена из таблиц приближенных его значений; для балансов за отдельные

годы — по средней месячной температуре придонного слоя воды [17] и рекомендованным авторами формулам. Изменение теплосодержания вод ( $B_T$ ) равно разнице теплоспасов водоема на первое число текущего и последующего месяца, отнесенной к средней за месяц акватории водоема ( $\text{см}^2$ ). Теплообмен в воде ( $B$ ) определен по уравнению из работы [13].

Величины некоторых компонентов радиационного и теплового балансов Иваньковского водохранилища, рассчитанные для средних многолетних ( $S$ ) и годовых метеоусловий, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наблюденная ( $Q$ ) и рассчитанные характеристики радиационного и теплового балансов Иваньковского водохранилища ( $\text{ккал}/\text{см}^2$  месяц)

Период	V	VI	VII	VIII	IX	X	Сумма за V—X
<b>Суммарная солнечная радиация (<math>Q</math>)</b>							
Средняя многолетняя	13,1	14,3	14,4	10,7	6,6	3,0	62,1
1967	14,9	16,6	13,8	9,5	7,3	2,5	64,6
1968	12,0	17,2	11,6	12,5	7,0	2,4	62,7
1969	12,0	15,6	14,7	11,6	7,2	3,4	64,5
1970	14,4	14,4	15,2	10,7	6,4	1,7	62,8
1972	13,6	17,0	15,0	13,0	6,9	2,3	67,8
<b>Радиационный баланс (<math>R</math>)</b>							
$S$	8,6	9,0	9,4	6,1	2,7	0,2	36,0
1967	10,9	11,6	9,4	6,1	2,4	0,1	40,5
1968	8,4	13,0	7,9	8,6	2,1	-0,4	39,6
1969	8,5	10,5	11,0	7,7	2,5	0	40,2
1970	9,4	9,6	11,7	7,1	3,1	0	40,9
1972	10,0	12,2	11,1	8,5	3,1	-0,2	44,7
<b>Поглощенная радиация (<math>B_K</math>)</b>							
$S$	12,0	13,2	13,2	9,8	6,0	2,6	56,8
1967	13,7	15,3	12,6	8,6	6,5	2,2	58,9
1968	11,0	16,0	10,7	11,5	6,2	2,0	57,4
1969	11,2	14,4	13,5	10,4	6,5	3,1	59,1
1970	13,1	13,4	14,1	9,6	5,7	1,5	57,4
1972	12,5	15,6	13,6	12,0	6,2	2,0	61,9
<b>Потери тепла на испарение (<math>LE</math>)</b>							
$S$	3,3	5,5	6,3	4,7	3,5	1,2	24,5
1967	5,0	7,1	6,7	4,7	3,5	1,0	28,0
1963	3,6	8,3	6,1	4,5	4,2	1,0	27,7

Период	V	VI	VII	VIII	IX	X	Сумма за V—X
1969	3,4	5,7	6,7	6,6	4,5	1,0	27,9
1970	4,1	6,3	7,2	6,0	3,4	1,1	28,3
1972	4,0	7,4	8,2	6,9	4,2	0,8	31,5

**Теплообмен с атмосферой (P)**

S	2,3	2,8	2,9	2,4	2,4	1,2	14,0
1967	2,9	3,6	2,6	2,6	2,3	0,0	14,9
1968	2,4	3,1	3,0	2,8	2,7	1,4	15,4
1969	2,7	3,2	3,3	3,4	2,8	2,0	17,4
1970	2,7	3,1	3,0	3,1	2,6	1,0	15,5
1972	3,0	3,4	3,0	2,8	2,8	1,8	16,8

**Приток тепла с речными водами (В<sub>п</sub>)**

S	2,8	3,1	3,3	2,3	2,0	1,1	14,6
1967	3,3	2,9	2,0	1,5	1,3	0,9	11,9
1968	2,8	3,1	2,7	2,1	0,9	0,4	12,0
1969	1,9	3,2	1,6	1,1	1,0	0,5	9,3
1970	3,9	3,1	2,6	1,6	0,8	0,6	12,6
1972	3,2	3,2	3,2	2,2	0,9	0,4	13,1

**Сброс тепла с водами (В<sub>с</sub>)**

S	2,8	3,0	2,7	2,4	1,7	1,4	14,0
1967	2,9	3,1	1,8	1,8	1,9	0,9	12,4
1968	4,2	3,0	2,6	2,1	2,0	0,6	14,5
1969	1,8	3,4	2,0	1,9	1,3	0,7	11,1
1970	3,8	2,9	2,6	1,8	1,2	0,7	13,0
1972	2,8	3,2	2,1	2,1	1,4	0,8	12,4

**Анализ величин компонентов радиационного  
и теплового балансов**

Радиационный баланс Иваньковского водохранилища за май—октябрь составил около 36 ккал/см<sup>2</sup>—64% от поглощенной радиации—и по величине оказался близким к среднему за 1948—1964 гг. радиационному балансу Рыбинского водохранилища, равному 37,4 ккал/см<sup>2</sup> или 66% поглощенного солнечного тепла [6]. Расход солнечной энергии на испарение, эффективное излучение и турбулентный обмен в указанных водоемах различен. Эффективное излучение больше в Иваньковском водохранилище на 0,2—0,5 ккал/см<sup>2</sup> мес.; потери тепла на испарение различались на 0,5÷—2,2 ккал/см<sup>2</sup>мес, причем в мае больше потери в Иваньковском



водохранилище, а в остальные месяцы — в Рыбинском; турбулентный обмен во все месяцы, кроме октября, больше в Ивановском: в мае значения его в сравниваемых водоемах равнялись соответственно — 2,3 и 0,9 ккал/см<sup>2</sup>; летом и осенью направление тепловых потоков в обоих водоемах одинаково, но величина его в первом примерно на 1 ккал/см<sup>2</sup> больше, чем во втором, и только в октябре теплообмен выше в Рыбинском на 0,5 ккал/см<sup>2</sup>.

М. П. Тимофеев, рассматривая основные закономерности формирования метеорологического режима над открытыми водоемами указывает, что величина испарения, а следовательно и потеря тепла на него, линейно зависит от скорости ветра. Интенсивность теплообмена при равновесных условиях определяется прежде всего динамическими факторами, при неравновесных — термическими. Влияние последних летом настолько существенно, что они определяют величину и знак теплообмена [19, 20].

Различные размеры, разный водный и температурный режим сравниваемых водохранилищ позволяют предположить существование в них на границе вода — воздух теплотоков разного направления и разной величины, а также различную интенсивность влагообмена, особенно в переходные периоды, когда индивидуальные особенности режима проявляются наиболее отчетливо.

Иваньковское водохранилище по акватории и объему значительно меньше Рыбинского. Весеннее наполнение и очищение его наблюдается около середины апреля. Благодаря многократному обновлению объема (до 13,5 раз за апрель — май) [7] водоем заполняют все более теплые воды и водная масса его быстро и интенсивно прогревается.

В Рыбинском водохранилище, где сохраняется значительный объем зимних вод и аккумулируются воды половодья, прогрев вод идет значительно медленнее. Хотя в весенний переходный период на таяние льда здесь затрачивается около половины всего поступающего тепла [10], очищается водоем только в первой декаде мая. Поэтому в мае температура воды Ивановского водохранилища выше, чем Рыбинского в среднем на 4° и выше температуры воздуха на 1—3°; над Рыбинским водохранилищем воздух теплее воды на 2—3° [14, 16]. При таком соотношении температур воды и воздуха эффективное излучение, потери тепла на испарение и турбулентный обмен в мае будут выше в более прогретом Ивановском водохранилище; поток тепла на границе вода — воздух здесь будет направлен в атмосферу, а в Рыбинском — в воду. В переходный период этот водоем получает от атмосферы около 27% общего количества тепла и только 5% его тратит на испарение [10].

Летом и осенью температура воды в сравниваемых водоемах имеет близкие значения; скорость ветра больше над Рыбинским водохранилищем на 1—2 м/с, а разность температур вода — воздух во все месяцы, кроме октября, больше в Ивановском [14, 16]. В летних условиях потери тепла на испарение должны быть выше в Рыбинском водохранилище, а теплообмен — в Ивановском. Осенью исследуемый водоем постепенно заполняется более холодными реч-

ными водами. Теплообмен с атмосферной в нем снижается, и в октябре величина его меньше, чем в Рыбинском водохранилище, воды которого охлаждаются значительно медленнее. По этой же причине в Ивановском водохранилище теплообмен в сентябре и октябре ниже, чем летом.

### Тепловой баланс Ивановского водохранилища

Основное тепло водохранилище получает от поглощенной солнечной радиации. При среднемноголетних метеоусловиях за май — октябрь этот источник дает 78% поступающего в водоем тепла, речные воды — около 20%, теплообмен с грунтом — 1,5% (табл. 3). Величина поглощенной радиации изменяется от 13,2 (июнь, июль)

Таблица 3

#### Тепловой баланс Ивановского водохранилища

(средний расчетный)  $\frac{\text{ккал/см}^2 \text{ месяц}}{\%}$

Составляющие	V	VI	VII	VIII	IX	X	Сумма за V-X
Приход							
Поглощенная радиация, $B_n$	12,0	13,2	13,2	9,8	6,0	2,6	56,8
	16,5	18,2	18,2	13,5	8,3	3,5	78,2
Тепло, вносимое реками, $B_n$	2,8	3,3	3,3	2,3	2,0	1,1	14,8
	3,9	4,5	4,5	3,2	2,8	1,5	20,4
Теплообмен с грунтом, $B_r$	—	—	—	—	0,3	0,7	1,0
					0,4	1,0	1,4
Сумма прихода	14,8	16,3	16,5	12,1	8,3	4,4	72,6
	20,4	22,7	22,7	16,7	11,5	6,0	100
Расход							
Эффективное излучение, $E_{эф}$	3,5	4,1	3,9	3,7	3,0	2,4	20,6
	4,6	5,4	5,2	4,8	4,0	3,2	27,2
Потери тепла на испарение, $LE$	3,3	5,5	6,3	4,7	3,5	1,2	24,5
	4,3	7,3	8,3	6,2	4,6	1,6	32,3
Теплообмен с атмосферой, $P$	2,3	2,8	2,9	2,4	2,4	1,2	14,0
	3,0	3,7	3,8	3,2	3,2	1,6	18,5
Тепло, сбрасываемое с водами, $B_c$	2,8	2,9	2,7	2,4	1,7	1,4	13,9
	3,7	3,8	3,6	3,2	2,2	1,8	18,3
Теплообмен с грунтом, $B_r$	1,0	0,9	0,7	0,2	—	—	2,8
	1,3	1,2	0,9	0,2			3,7
Сумма расхода	12,9	16,2	16,5	13,4	10,6	6,2	75,8
	16,9	21,4	21,8	17,7	14,0	8,2	100
Изменение теплосодержания в воде, $B_t$	3,0	1,0	0,2	-1,0	-3,1	-2,2	-2,1
Невязка баланса, $H$	-1,1	-0,7	-0,2	-0,3	0,8	0,4	-1,1
Невязка баланса, %	7,4	4,3	1,2	2,2	7,5	6,4	1,5

до 2,6 (октябрь) ккал/см<sup>2</sup>, а доля ее в месячном приходе тепла 80—60%. Речные воды наибольшее количество тепла (3,3 ккал/см<sup>2</sup>) вносят в июне — июле, наименьшее (1,1 ккал/см<sup>2</sup>) — в октябре. Во все месяцы доля этой статьи в общем приходе тепла от 19 до 24%. Тепло, возвращенное грунтом, в октябре составляет 16%, в сентябре — менее 5%.

В расходной части баланса на первом месте потери тепла на испарение — 32%, затем эффективное излучение — 27%; на теплообмен с атмосферой уходит около 18% тепла и столько же выносится из водохранилища водами, забираемыми в канал и сбрасываемыми через гидроузел; поток тепла в грунт не превышает 4%.

В месячном расходе тепла потери на испарение, излучение и подогрев атмосферы составляют 75—80%, в нижний бьеф и канал уходит 16—22% тепла, а в грунт — не более 8%. Летом наибольшее количество тепла (33—38%) расходуется на испарение, в октябре — на эффективное излучение (39%).

При средних многолетних метеорологических условиях с мая по июль приход тепла превышает расход или равен ему; теплосодержание вод в это время увеличивается, особенно интенсивно в мае. В августе — октябре водохранилище расходует тепла больше, чем получает, и воды его охлаждаются; наиболее интенсивно этот процесс идет в сентябре. Поскольку в расчетный период не вошел апрель, в течение которого воды получают 3,5—5,0 ккал/см<sup>2</sup>, баланс тепла в водохранилище с мая по октябрь оказался отрицательным, с учетом апреля он был бы положительным.

В таблице 4 приведены тепловые балансы Ивановского водохранилища за 1967—1970, 1972 гг. Приход тепла в водоем и его расход колебались в эти годы соответственно от 69 до 76 и от 71 до 80 ккал/см<sup>2</sup>. Наибольший и наименьший месячный приход тепла различались между собой летом на 1,5—4,0, осенью на 1,0—2,5 ккал/см<sup>2</sup>, а колебание месячных величин отдельных компонентов баланса составляло 0,5—3,5 ккал/см<sup>2</sup> мес. (табл. 5).

Баланс тепла в водоеме характеризуется изменением теплосодержания его вод ( $B_T$ ). В рассматриваемые годы величина  $B_T$  в мае — июне была положительной и равнялась 3,0—1,3 ккал/см<sup>2</sup> мес.; в июле — августе имело место как увеличение теплосодержания вод до 1,4 ккал/см<sup>2</sup> мес (VIII, 1968), так и уменьшение до 2,4 ккал/см<sup>2</sup> мес. (VIII, 1970); осенью теплосодержание снижалось на 0,9—4,8 ккал/см<sup>2</sup> мес (табл. 5).

При значительных естественных колебаниях величин приходно-расходных компонентов их доля в балансе тепла за отдельные месяцы и периоды изменялась незначительно. Прохладным и дождливым летом 1968 г. и жарким и сухим 1972 г. поглощенная солнечная радиация давала водоему около 82% тепла, 17% тепла вносили реки; 37—39% — тратилось на испарение, по 20—22% — на эффективное излучение и теплообмен с воздухом.

**Тепловой баланс Ивановского водохранилища  
за 1967—1970, 1972 гг. (ккал/см<sup>2</sup> мес.)**

Компоненты	V	VI	VII	VIII	IX	X	Всего за V—X	
							ккал см²	%
1967 г.								
Приход								
Поглощенная радиация Вк	13,7	15,3	12,6	8,6	6,5	2,2	58,9	82,9
Тепло, вносимое реками, Вп	3,3	2,9	2,0	1,5	1,3	0,9	11,9	16,7
Теплообмен с грунтом, Вг	—	—	—	—	0,1	0,2	0,3	0,4
Сумма прихода	17,0	18,2	14,6	10,1	7,9	3,3	71,1	100,0
Расход								
Эффективное излуче- ние, Eэф	2,8	3,7	3,2	2,0	1,8	1,0	14,5	20,4
Потери тепла на испаре- ние, LE	5,0	7,1	6,7	4,7	3,5	1,0	28,0	39,2
Теплообмен с атмосфе- рой, Р	2,9	3,6	2,6	2,6	2,3	0,9	14,9	20,9
Тепло, сбрасываемое с водой, Вс	2,9	3,1	1,8	1,8	1,9	0,9	12,4	17,4
Теплообмен с грунтом, Вг	0,3	0,6	0,4	0,2	—	—	1,5	2,1
Сумма расхода	13,9	18,1	14,7	11,3	9,5	3,8	71,3	100
Изменение теплосодер- жания вод, Вт	3,0	1,1	0	-0,9	-2,7	-0,9	-0,4	
Невязка теплового ба- ланса, Н	0,1	-1,0	-0,1	-0,3	1,1	0,4	0,2	
Невязка теплового ба- ланса, Н%	0,6	5,5	0,7	2,7	11,6	10,5	0,3	
1968 г.								
Приход								
Поглощенная радиация, Вк	11,0	16,0	10,7	11,5	6,2	2,0	57,4	82,2
Тепло, вносимое реками, Вп	2,8	3,1	2,7	2,1	0,9	0,4	12,0	17,2
Теплообмен с грунтом, Вг	—	—	—	—	0,2	0,2	0,4	0,6
Сумма прихода	13,8	19,1	13,4	13,6	7,3	2,6	69,8	100,0
Расход								
Эффективное излучение, Еэф	2,6	3,0	2,8	2,9	2,1	2,0	15,4	20,7
Потери тепла на испаре- ние, LE	3,6	8,3	6,1	4,5	4,2	1,0	27,7	37,4
Теплообмен с атмосфе- рой, Р	2,4	3,1	3,0	2,8	2,7	1,4	15,4	20,7
Тепло, сбрасываемое с водой, Вс	4,2	3,0	2,6	2,1	2,0	0,6	14,5	19,6
Теплообмен с грунтом, Вг	0,2	0,5	0,3	0,2	—	—	1,2	1,6

Компоненты	V	VI	VII	VIII	IX	X	Всего за V—X	
							ккал см <sup>2</sup>	%
Сумма расхода	13,0	17,9	14,8	12,5	11,0	5,0	74,2	100
Изменение теплосодержания вод, $V_t$	1,8	1,7	-1,2	1,4	-4,8	-2,5	-3,6	
Невязка теплового баланса, Н	-1,0	-0,5	-0,2	-0,3	1,1	0,1	-0,8	
Невязка теплового баланса, Н%	7,2	2,6	1,4	2,2	10,0	2,0	1,1	

1969 г.

Приход								
Поглощенная радиация, $V_k$	11,2	14,4	13,5	10,4	6,5	3,1	59,1	86,1
Тепло, вносимое реками, $V_p$	1,9	3,2	1,6	1,1	1,0	0,5	9,3	13,5
Теплообмен с грунтом, $V_g$	—	—	—	—	0,2	0,1	0,3	0,4
Сумма прихода	13,1	17,6	15,1	11,5	7,7	3,7	68,7	100
Расход								
Эффективное излучение, $E_{эф}$	2,7	3,8	3,0	2,8	2,5	2,1	16,9	22,6
Потери тепла на испарение, LE	3,4	5,7	6,7	6,6	4,5	1,0	27,9	37,4
Теплообмен с атмосферой, P	2,7	3,2	3,3	3,4	2,8	2,0	17,4	23,4
Тепло, сбрасываемое с водами, $V_c$	1,8	3,4	2,0	1,9	1,3	0,7	11,1	14,9
Теплообмен с грунтом, $V_g$	0,4	0,4	0,3	0,2	—	—	1,3	1,7
Сумма расхода	11,0	16,5	15,3	14,9	11,1	5,8	74,6	100
Изменение теплосодержания вод, $V_t$	2,2	1,6	0,7	-2,1	-2,8	-2,5	-2,9	
Невязка теплового баланса, Н	-0,1	-0,5	-0,9	-1,3	-0,6	0,4	-3,0	
Невязка теплового баланса, Н%	0,9	2,8	-6,0	8,7	5,4	6,9	4,0	

1970 г.

Приход								
Поглощенная радиация, $V_k$	13,1	13,4	14,1	9,6	5,7	1,5	57,4	81,5
Тепло, вносимое реками, $V_p$	3,9	3,1	2,6	1,6	0,8	0,6	12,6	17,9
Теплообмен с грунтом, $V_g$	—	—	—	—	0,2	0,2	0,4	0,6
Сумма прихода	17,0	16,5	16,7	11,2	6,7	2,3	70,4	100
Расход								
Эффективное излучение, $E_{эф}$	3,7	3,8	2,4	2,6	2,0	1,5	16,0	21,6
Потери тепла на испарение, LE	4,1	6,3	7,4	6,0	3,4	1,1	28,3	38,2

Компоненты	V	VI	VII	VIII	IX	X	Всего за V-X	
							ккал см <sup>2</sup>	%
Теплообмен с атмосферой, Р	2,7	3,1	3,0	3,1	2,6	1,0	15,5	21,0
Тепло, сбрасываемое с водой, Вс	3,8	2,9	2,6	1,8	1,2	0,7	13,0	17,6
Теплообмен с грунтом, Вг	0,2	0,5	0,4	0,1	—	—	1,2	1,6
Сумма расхода	14,5	16,6	15,8	13,6	9,2	4,3	74,0	100
Изменение теплосодержания вод, Вт	1,6	1,3	0,6	-2,4	-2,2	-2,3	-3,4	
Невязка теплового баланса, Н	0,9	-1,4	0,3	0	-0,3	0,3	-0,2	
Невязка теплового баланса Н%	5,3	8,5	1,8	0	3,3	7,0	0,3	

1972

Приход								
Поглощенная радиация, В <sub>к</sub>	12,5	15,6	13,6	12,0	6,2	2,0	61,9	81,5
Тепло, вносимое реками, В <sub>п</sub>	3,2	3,2	3,2	2,2	0,9	0,4	13,1	17,2
Теплообмен с грунтом, В <sub>г</sub>	—	—	—	—	0,6	0,4	1,0	1,3
Сумма расхода	15,7	18,8	16,8	14,2	7,7	2,8	76,0	100
Приход								
Эффективное излучение, Е <sub>эф</sub>	2,5	3,4	3,5	3,5	3,1	1,9	17,9	22,3
Потери тепла на испарение, LE	4,0	7,4	8,2	6,9	4,2	0,8	31,5	39,3
Теплообмен с атмосферой, Р	3,0	3,4	3,0	2,8	2,8	1,8	16,8	20,9
Тепло, сбрасываемое с водой, Вс	2,8	3,2	2,1	2,1	1,4	0,8	12,4	15,5
Теплообмен с грунтом, В <sub>г</sub>	0,5	0,4	0,4	0,3	—	—	1,6	2,0
Сумма расхода	12,8	17,8	17,2	15,6	11,5	5,3	80,2	100
Изменение теплосодержания вод, Вт	2,7	2,0	-0,3	-1,7	-3,5	-2,0	-2,8	
Невязка теплового баланса, Н	0,2	-1,0	-0,1	0,3	-0,3	-0,5	-1,4	
Невязка теплового баланса, Н%	1,3	5,3	0,6	1,9	2,6	9,4	1,7	

Устойчивое соотношение компонентов теплового баланса прослеживается и в других водоемах [6, 21]. Определяется оно ведущей ролью зональных метеорологических процессов в нагревании и охлаждении водоемов. Сравнение тепловых балансов Ивановского и Рыбинского водохранилищ показало, что по абсолютной величине компонентов, их сезонному ходу, роли в тепловом режиме водоема они близки между собой. Исключение составляет приход и расход

**Наибольшие и наименьшие значения некоторых компонентов теплового баланса за 1967—1970, 1972 гг. (ккал/см<sup>2</sup>)**

Компоненты	Значение	V	VI	VII	VIII	IX	X	Сумма за У—X
В <sub>к</sub>	наибольшее	13,7	16,0	14,1	12,0	6,5	3,1	61,9
	наименьшее	11,0	13,4	10,7	8,6	5,7	1,5	57,4
	разность	2,7	2,6	3,4	3,4	0,8	1,6	4,5
Е <sub>эф</sub>	наибольшее	3,7	3,8	3,2	3,5	4,1	3,1	19,0
	наименьшее	2,5	3,0	2,4	2,6	2,6	1,5	16,6
	разность	1,2	0,8	0,8	0,9	1,5	1,6	2,4
LE	наибольшее	5,0	8,3	8,2	6,9	4,5	1,1	31,5
	наименьшее	3,4	5,7	6,1	4,7	3,4	0,8	27,7
	разность	1,6	2,6	2,1	2,2	1,1	0,3	3,8
P	наибольшее	3,0	3,6	3,3	3,4	2,8	2,0	17,4
	наименьшее	2,7	3,1	2,6	2,6	2,3	0,9	14,9
	разность	0,3	0,5	0,7	0,8	0,5	1,1	2,3
Сумма прихода	наибольшее	17,0	19,1	16,8	14,2	7,7	3,7	76,0
	наименьшее	13,1	16,5	13,4	10,1	6,7	2,3	69,0
	разность	3,9	2,6	3,4	4,1	1,0	1,4	7,0
Сумма расхода	наибольшее	14,5	18,1	17,2	15,6	11,5	5,8	80,0
	наименьшее	11,0	16,5	14,7	11,3	9,2	3,8	71,0
	разность	3,5	1,6	2,5	4,3	2,3	2,0	9,0
В <sub>т</sub>	наибольшее	3,0	2,0	0,7	1,4	-4,8	-2,5	-0,4
	наименьшее	1,8	1,3	-1,2	-2,4	-2,7	-0,9	-3,6
	разность	1,2	0,7	1,9	3,8	-2,1	-1,6	3,2

тепла с водой: в Ивановском водохранилище, обновляющем свой объем примерно раз в месяц, вклад этих статей в соответствующие части баланса составляет около 20%, а в Рыбинском, где смена вод осуществляется раз в семь месяцев, величина указанных компонентов меньше точности расчета основных составляющих баланса [5, 10].

С 1965 г. в озеровидную часть водохранилища, называемую Ивановским плесом, стали сбрасываться подогретые воды Конаковской ГРЭС. Количество дополнительного тепла, поступающего с ними, определяется их объемом и величиной подогрева, а при расчете на единицу площади — величиной акватории обогреваемого участка.

В 1970 г. при оптимальном режиме работы электростанции приток дополнительного тепла в плес составлял 1,2—1,5 ккал/см<sup>2</sup> в месяц и около 8 ккал/см<sup>2</sup> за расчетный период. Поступление тепла в плес увеличивалось летом на 7—12, осенью на 20—50, а за V—X на 11% по сравнению с естественным и составило 78 ккал/см<sup>2</sup> — величину, характерную для водоемов южных районов европейской части страны, например Цимлянского водохранилища [21]. Сумма расхода тепла повышалась летом на 6—10, осенью — 13—18%, а в целом за безледный период на 9%. Увеличение отдельных статей расхода составило преимущественно 7—10, реже 15—20%.

В табл. 6 приведены данные о приходе и расходе дополнительно-го тепла в 1970 г.: на испарение и эффективное излучение израсходовано 4,2 ккал/см<sup>2</sup> или 53% тепла, поступившего от ГРЭС; на теплообмен с атмосферой и вынос тепла с водами — 2,5 ккал/см<sup>2</sup> (31%); теплоотдача в грунт изменялась незначительно и оставшееся тепло — 1,3 ккал/см<sup>2</sup> (16%) аккумулировалось водой.

Приведенные данные рассчитаны для условий равномерного распределения дополнительного тепла в плесе, но реально в пределах его существует сильно, умеренно и слабо подогреваемые участки [11]. В первых двух, занимающих около 5% акватории и 10% объема плеса, за счет подогретых вод приток тепла увеличивается летом на 40—60%, а весной и осенью — в 1,5—3,0 раза. Расход тепла на эффективное излучение, испарение и теплообмен с воздухом здесь повышается на 25—50%, а возможно и более, поскольку расчеты эти, выполненные без специальных метеорологических наблюдений [18], нуждаются в уточнении.

В зоне слабого подогрева, которая включает большую часть акватории и объема плеса, дополнительное тепло составляло 0,4—0,6 ккал/см<sup>2</sup> в месяц или 3,4—3,6 ккал/см<sup>2</sup> за безледный период. Приток тепла повышался летом не более, чем на 5%, осенью — до 25%; расход тепла увеличивался несколько меньше — до 15% осенью.

Не все тепло, поступившее в плес с подогретыми водами, расходуется в том же месяце — часть его остается в водоеме (табл. 6). Ниже показано изменение теплосодержания вод Ивановского водохранилища в естественных условиях и в зоне слабого подогрева (1970 г.).



Изменение теплосодержания вод (ккал/см <sup>2</sup> мес)	V	VI	VII	VIII	IX	X	Всего за V—X
В естественных условиях	1,6	1,3	0,6	—2,4	—2,2	—2,3	—3,4
В подогреваемой зоне	1,9	1,4	0,7	—2,0	—2,6	—1,9	—2,5

Таблица 6

**Приход и расход дополнительного тепла в Ивановском  
плесе в 1970 г. (ккал/см<sup>2</sup>)**

Составляющие	V	VI	VII	VIII	IX	X	Всего за V—X
<b>Приходная часть</b>							
Тепло, поступившее со сброшенными водами, В <sub>д</sub>	1,2	1,4	1,5	1,5	1,2	1,2	8,0
<b>Расходная часть</b>							
Эффективное излучение, Е <sub>эф</sub>	0,1	0,3	0,5	0,4	0,4	0,2	1,9
Потери тепла на испаре- ние, LE	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,2	2,3
Теплообмен с атмосферой, Р	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,1	1,4
Вынос тепла с водами, В <sub>с</sub>	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	1,1
Всего израсходовано	0,9	1,2	1,5	1,1	1,2	0,8	6,7
Остаток тепла в воде	0,3	0,2	0,0	0,4	0,0	0,4	1,3

Весной и летом подогреваемые воды способствуют прогреву водной толщи, осенью — задерживают ее охлаждение. Изменение теплосодержания вод за V—X в обогреваемой части плеса ( $-2,5$  ккал/см<sup>2</sup>) меньше естественного ( $-3,4$ ) на величину, близкую количеству тепла, аккумулированного за это время водой (табл. 6).

Аккумуляция водой части дополнительного тепла обеспечила повышенную по сравнению с естественной температуру воды Ивановского плеса. До постройки электростанции весной и в начале лета у гидроузла (г. Дубна) температура водоема была на  $1-2^{\circ}$  ниже, чем в средней части (г. Конаково), поскольку приплотинная часть заполнялась более холодными водами. Весной и в начале лета 1970 г. разность среднемесячных температур воды у Дубны и Конакова составляла  $0-0,7^{\circ}$ , а среднедекадных — достигала  $1,2^{\circ}$ ; осенью та же разность увеличивалась соответственно до  $1,5$  и  $1,9^{\circ}$  [2, 3]. Примерно такое же соотношение температур наблюдалось у этих водомерных постов в 1971—1973 гг.

### Заключение

Основной источник тепла — поглощенная водой солнечная радиация — дает Ивановскому водохранилищу с мая по октябрь в сред-

нем около 57 ккал/см<sup>2</sup> или 78% всего поступающего тепла; за счет теплового стока рек водоем получает 15 ккал/см<sup>2</sup>, вместе эти два источника дают более 98% естественного теплопритока.

Сумма потерь тепла по основным статьям расхода — испарению, эффективному излучению, турбулентному теплообмену — составляет около 59 ккал/см<sup>2</sup> (78% расхода); сброшенные и забранные в канал воды выносят 14,0 ккал/см<sup>2</sup> (18,5%); поток тепла в грунт — около 3,0 ккал/см<sup>2</sup> или 3,5% от суммы расхода.

В 1967—1970, 1972 гг. месячные величины приходно-расходных компонентов отклонялись от средних расчетных значений преимущественно на  $\pm 1,5$ —3,0 ккал/см<sup>2</sup> ( $\pm 10$ —50%), а за май-октябрь от  $-5$  до 4 ккал/см<sup>2</sup> ( $\pm 5$ —6%).

Подогретые воды Конаковской ГРЭС увеличили приток тепла летом на 7—12, осенью — до 50%, а за расчетный период на 11% от его естественной величины. Потери тепла за месяц повышались летом до 10, осенью до 20%. Количество дополнительного тепла, поступающего в слабо подогреваемую зону, примерно вдвое меньше естественных колебаний месячного и сезонного притока тепла.

Роль подогретых вод в тепловом режиме отдельных участков Ивановского плеса различна: в зоне умеренного и сильного подогрева ранней весной и осенью дополнительное тепло превышает количество поглощенной солнечной энергии и определяет величину и ход температуры воды; в конце весны и летом оно усиливает естественный прогрев вод и сглаживает внутрисезонные колебания температуры. В зоне слабого подогрева во все сезоны температурные условия определяются количеством поглощенной солнечной радиации, а среднее повышение температуры водной массы за счет подогретых вод [3] примерно вдвое ниже многолетних естественных колебаний среднемесячных и декадных температур воды.

Тепловой режим Ивановского водохранилища имеет некоторые особенности, обусловленные его высоким водообменом. Весной при многократном обновлении объема в водоем непрерывно поступают все более теплые воды. Теплосодержание водной массы быстро повышается, что ведет к увеличению потерь тепла на испарение, эффективное излучение и турбулентный теплообмен. Осенью наблюдается обратная картина — поступление холодных речных вод вызывает уменьшение теплозапаса и теплопотерь.

При относительно равномерном поступлении в плес дополнительного тепла расходование его идет неравномерно не только вследствие изменчивости метеорологических условий, но и под влиянием сложной и неустойчивой динамики сброшенных вод и всей водной массы плеса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Браславский А. П.** и **З. А. Викулина.** Нормы испарения с поверхности водохранилищ. Л., 1954.
2. **Буторин Н. В., Курдина Т. Н.** О температурном воздействии Конаковской ГРЭС на воды Ивановского водохранилища. В кн.: Гидрохимия и гидробиология водоемов — охладителей тепловых электростанций СССР. Киев, 1971, с. 19—36.

3. Бугорин Н. В., Курдина Т. Н. Статистический анализ поля температуры в Ивановском водохранилище. Информ. бюлл. «Биол. внутр. вод.» 1972, № 15, с. 54—59.
4. Гущина Л. А. Метод расчета влажности воздуха над Рыбинским водохранилищем. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 4, Л., 1968, с. 107—116.
5. Зайцева Е. А. Тепловой баланс Рыбинского водохранилища. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 2, Л., 1965, с. 72—91.
6. Зайцева Е. А. Уточнение составляющих теплового баланса Рыбинского водохранилища. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 4, Л., 1968, с. 11—21.
7. Зиминова Н. А. Элементы гидрологического режима и водный баланс Ивановского водохранилища за 1951—1956 гг. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2(5), М.-Л., 1959, с. 212—228.
8. Кириллова Т. В., Огнева Т. А. Особенности теплового баланса водной поверхности. Метеорология и гидрология. 1956, № 4, с. 41—46.
9. Кириллова Т. В., Тервинский В. Н., Честная И. И. О наблюдениях за облачностью над водохранилищами. Тр. ГГО, вып. 95, Л., 1963, с. 30—32.
10. Колкутин В. И., Тачалов С. Н. Тепловой баланс Рыбинского водохранилища в весенний переходный период. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 5, Л., 1970, с. 18—26.
11. Курдина Т. Н. Акватория и объем подогретых вод в Ивановском водохранилище. Информ. бюлл. «Биол. внутр. вод», 1976, № 31, с. 56—60.
12. Питерская Л. П. Сведения о некоторых характеристиках метеорологического режима на территории Ивановского водохранилища и методика их расчета. Сб. работ Горьковской, Волжской и Рыбинской гидрометеорол. обсерв. Л., 1973, с. 136—153.
13. Рекомендации по определению составляющих теплового баланса водоемов, Л., ГГО, 1965.
14. Ресурсы поверхностных вод. Основные гидрологические характеристики, т. 10, Л., 1967.
15. Рутковский В. И. Опыт применения скоростной съемки температуры и электропроводности воды для изучения температурного режима и перемещения водных масс в водохранилищах. В кн.: «Методы изучен. и использ. водн. ресурсов». М., 1964, с. 60—83.
16. Справочник по климату СССР, в. 8, ч. I, II, III, IV, V, Л., 1964—1968 гг.
17. Тачалов С. Н. Особенности термического режима Ивановского и Угличского водохранилищ. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв. вып. 3, Л., 1966, с. 75—85.
18. Технические указания к расчету прудов-охладителей. М. — Л., 1963.
19. Тимофеев М. П. Об изменении скорости ветра под влиянием водоемов. Тр. ГГО, вып. 95, Л., 1963, с. 33—41.
20. Тимофеев М. П. Метеорологический режим водоемов. Л., 1963.
21. Шпак И. С. Тепловой баланс Цимлянского водохранилища. Сб. работ Цимлянской гидрометеорол. обсерв., вып. 2, Л., 1961, с. 27—35.

А. С. Литвинов

## Структура течений в верховолжских водохранилищах

Исследования, выполненные в лаборатории гидрологии Института биологии внутренних вод АН СССР, позволили составить представление о режиме течений в верховолжских водохранилищах, на примере Рыбинского водохранилища — установить связь с длинными волнами, возникающими в ходе регулирования работы гидросооружений и составить генеральную схему перемещения его вод [1, 4, 5, 7, 8]. Однако эти исследования не могут дать исчерпывающих сведений о структуре течений даже в Рыбинском водохранилище.

Учитывая это, в лаборатории гидрологии были продолжены инструментальные наблюдения над течениями, позволившие получить некоторые дополнительные представления о переносе вод и структуре течений в верхововолжских водохранилищах.

Движение вод внутренних водоемов (течения) возникают под одновременным действием ряда разнородных факторов. Однако основными силами, формирующими макроциркуляцию вод в водоеме, являются градиентные силы (независимо от их происхождения) и касательное напряжение на водную поверхность, создаваемое ветром. В водохранилищах из градиентных течений наиболее существенное значение имеют стоковые, выраженные наиболее отчетливо в зимний период. Ветровые течения, как правило, дополняются инерционными (остаточными) перемещениями водных масс, сейшевыми, внутренними волнами. Все это говорит о том, что в водохранилищах наблюдается чрезвычайно сложная система течений. В их спектре будут отражены колебания скорости, связанные со всеми перечисленными составляющими движения вод.

Для получения полного представления о характеристиках течений в водоеме необходимы подробные сведения об их временной и пространственной изменчивости, то есть длительные непрерывные синхронные наблюдения во многих точках. Однако сбор таких материалов чрезвычайно сложен и трудоемок. В то же время при наличии дискретных измерений характеристик течения в точке, каждое из таких значений может рассматриваться как случайная величина, а весь ряд наблюдений — как совокупность случайных величин. Это дает возможность применять для обработки материалов наблюдений методы математической статистики. В настоящее время наиболее удобными для получения длительных рядов наблюдений над течениями являются самописцы БПВ-2р с автономной их установкой различными способами [3, 6]. Собранные с их помощью материалы позволяют изучать разномасштабные движения вод в водохранилищах и вычислить ряд статистических характеристик горизонтального обмена.

Одной из важнейших характеристик динамики вод является средний перенос за определенный промежуток времени, поскольку именно он, а не мгновенные скорости, определяет характер движения водных масс. В виду того, что движение вод носит турбулентный характер, то и направление переноса может существенно отличаться от фиксированного в конкретный момент времени направления течения.

Период осреднения при определении среднего переноса должен быть таким, чтобы влияние короткопериодных колебаний скорости было бы исключено. В верхововолжских водохранилищах период изменения внешних возмущающих сил для стоковых течений (период сброса вод через гидросооружения) составляет около 12 часов, период собственных колебаний водной массы не превышает 15 часов [7]. Поэтому за период осреднения целесообразно принять промежуток времени, равный суткам, поскольку в это время, как правило, укладывается два и более цикла изменения скорости. Сопо-

ставление величин среднесуточных скоростей течения с косвенными характеристиками перемещения водных масс показало, что в большинстве случаев среднесуточные скорости совпадают со скоростью перемещения водных масс. Безусловно, при изучении крупномасштабных структур, связанных с общей циркуляцией вод водохранилищ, периоды осреднения могут и должны быть значительно больше.

Наиболее простой способ вычисления результирующего переноса вод состоит в разложении вектора скорости на составляющие по координатным осям с последующим подсчетом их средних значений, и обратном переходе к вектору переноса.

Результаты подобных вычислений для стоковых течений в подледный период в Волжском плесе Рыбинского водохранилища свидетельствуют, что: 1) скорость переноса в 3—6 раз меньше «мгно-

Таблица 1

Статистические характеристики течений в Рыбинском водохранилище в подледный период

Длина ряда N	Составляющая на параллель			Составляющая на меридиан			V (см/с)	$\alpha^\circ$
	среднее (u)	средне- квадрати- ческое от- клонение, ( $\sigma_u$ )	коэффи- циент вариации ( $C_u$ )	среднее (v)	средне- квадрати- ческое от- клонение ( $\sigma_v$ )	коэффи- циент вариации ( $C_v$ )		
Пос. Мышкино								
1135	3,02	5,86	1,94	8,59	13,20	1,53	9,1	19
144	6,04	5,69	0,94	14,04	13,67	0,97	15,2	23
144	6,01	6,45	1,07	16,65	15,30	0,91	17,1	21
144	4,90	6,04	1,23	13,02	12,90	0,99	13,8	20
144	2,69	6,23	2,31	8,93	15,09	1,69	9,3	17
144	3,66	6,37	1,74	9,65	13,96	1,44	10,3	21
144	1,31	2,36	1,80	-0,10	4,22	42,19	1,3	94
144	-1,14	2,91	2,07	1,71	4,99	2,89	2,1	327
127	0,71	4,61	6,52	4,29	9,06	2,11	4,4	9
Пос. Волга								
1135	-5,08	8,18	1,61	4,81	8,42	1,75	7,0	313
144	-7,38	8,64	1,17	7,59	8,58	1,13	10,6	316
144	-9,86	9,37	0,95	9,69	9,41	0,97	13,9	314
144	-7,76	8,21	1,06	8,17	8,05	0,98	11,3	316
144	-5,30	9,99	1,87	5,43	9,94	1,83	7,6	316
144	-5,93	9,04	1,52	5,76	9,32	1,62	8,3	315
144	-0,09	2,01	1,15	-0,85	2,06	2,42	0,9	186
144	-1,30	2,53	1,93	0,09	2,95	31,26	1,3	274
127	-2,76	5,70	2,06	2,30	6,00	2,61	3,6	309

венных» скоростей течения; 2) в течение недельного цикла работы ГЭС в нижнем бьефе направление переноса устойчиво, но при воскресных перерывах в работе ГЭС перенос может иметь противоположное направление; 3) скорость переноса не остается постоянной; 4) коэффициенты вариации обратно пропорциональны скорости переноса (табл. 1).

В каскаде верхневолжских водохранилищ стоковые течения носят неустановившийся характер и целиком определяются распространением волн пусков, обусловленных неравномерностью работы гидросооружений [5, 7, 8]. Четкую картину периодичности течений в нижнем бьефе электростанций дают корреляционные функции, которые имеют вид почти правильной синусоиды с периодом, равным

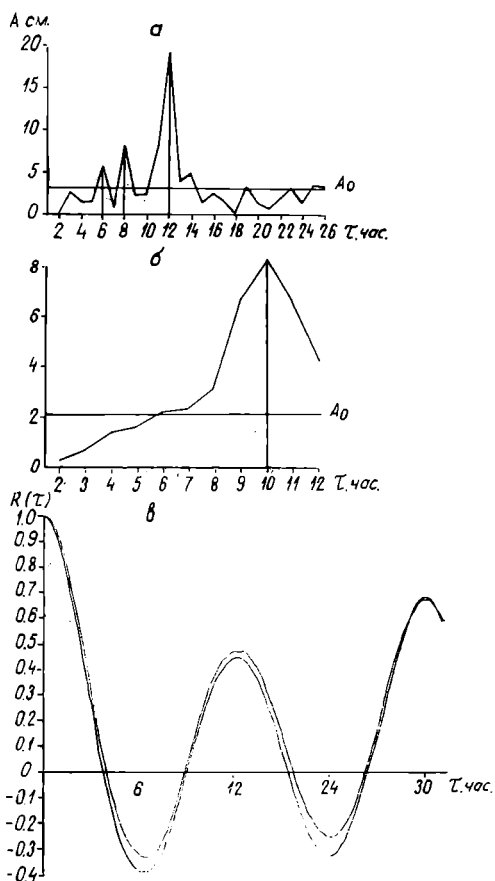


Рис. 1. Периодограммы вынужденных (а) и свободных (б) колебаний уровня и автокорреляционные функции (в) составляющих на меридиант и параллель в волжском плесе Рыбинского водохранилища

По оси абсцисс — испытательные периоды по оси ординат — амплитуда колебаний уровня (А) и автокорреляционная функция

11,8 часа (рис. 1 в). Такую же периодичность имеют и колебания уровня в течение недельного цикла работы ГЭС (рис. 1 а). Кроме основного периода, равного 12 часам, на периодограмме выделяются колебания с периодом 8 и 6 часов. Природа их, вероятно, связана с наложением свободных и вынужденных колебаний. Свободные колебания уровня возникают в плесе за счет отражения волн попусков и аналогичны одноузловой сейше в заливе, граничащем с широким водоемом. Период их может быть определен выражением:

$$T = 2 \int_0^L \frac{ds}{\sqrt{gH}} = 4 \int_0^L \frac{ds}{\sqrt{gH}}$$

где  $s$  — продольная координата,  $l$  — длина бьефа,  $H$  — средняя глубина сечения,  $L$  — удвоенная длина предполагаемого залива. Определение  $T$  из данного выражения и по натурным данным (рис. 1, б) дает одну и ту же величину, приблизительно равную 10 часам.

Периодические изменения скорости и направления течения приводят к тому, что в течение суток частицы воды совершают возвратно-поступательное движение при генеральном направлении перемещения в соответствии с бытовым течением Волги (рис. 2).

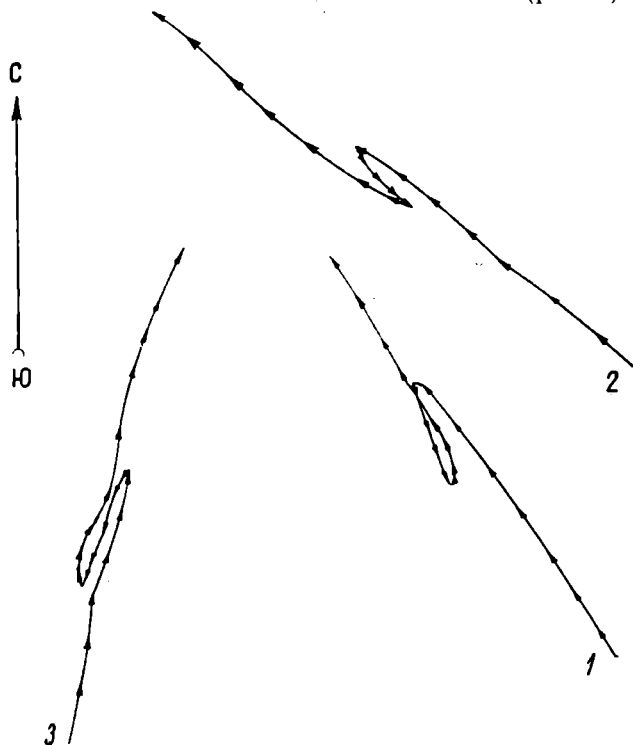


Рис. 2. Прогрессивно-векторные диаграммы скоростей течения в волжском плесе Рыбинского водохранилища  
1 — 38 км ниже Угличской ГЭС, 2 — в 55 км от ГЭС и 3 — 78 км от ГЭС

Кроме среднесуточных изменений скорости переноса вод, в водохранилищах наблюдаются сезонные изменения скорости. Они связаны с изменением величины речного стока в течение года. Максимальные скорости осредненного течения наблюдаются в период весеннего половодья. В летне-осенний период, при максимальном уровне водохранилищ, скорости переноса, обусловленные стоковыми течениями, минимальны. Зимой, при интенсивной сработке водохранилищ, скорости возрастают. При этом наблюдается четкая зависимость скорости течения от уровня наполнения водохранилища (табл. 2).

Таблица 2

Зависимость скорости течения в районе с. Коприно от уровня наполнения Рыбинского водохранилища

Уровень, м. условный	Площадь водного сечения (м <sup>2</sup> )	Расход через ГЭС (м <sup>3</sup> /с)	Средняя максимальная скорость течения (см/с)
-2,5	12441	950--1000	16,0
-2,7	11988	1100	18,0
-3,20	10906	1050--1200	20,0
-3,80	9743	1050--1200	24,0
-4,70	7857	1050--1150	33,0

Статистические характеристики течения в безледный период для Рыбинского и Ивановского водохранилищ приведены в таблице 3. В этот период практически на всей акватории Рыбинского водохранилища в верхнем трехметровом слое перенос вод осуществляется под действием ветра и его направление соответствует направлению ветра за исследуемый период. При этом время, необходимое для установления течения, соответствующего данному ветру, невелико и не превышает 3 часов при ветре 4—6 м/с [4]. Перемещение вод в глубинных слоях, как правило, осуществляется компенсационными течениями. Ввиду того, что движение вглубь жидкости передается только за счет сил вязкости и благодаря инерции водной массы, устойчивость течений в глубинных слоях больше, чем в поверхностных. Скорости среднесуточного переноса в безледный период также невелики. Коэффициенты вариации изменяются в широких пределах. В мелководных участках Рыбинского водохранилища от поверхности до дна среднесуточный перенос определяется ветром (табл. 4).

В озерной части Ивановского водохранилища и в безледный период результирующий среднесуточный перенос вод от поверхности до дна преимущественно направлен к плотине. Только при устойчивых ветрах восточной четверти в поверхностном слое суммарный перенос может быть в противоположном направлении (табл. 3, 7 июля). Коэффициент вариации составляющей течения по параллели ( $C_u$ ) значительно меньше коэффициента вариации меридиа-



**Статистические характеристики течения в безледный период  
в Ивановском и Рыбинском водохранилищах**

Дата	Гори- зонт, м	Составляющая на параллель			Составляющая на меридиан			V см/с	$\alpha^\circ$
		u	$\sigma_u$	$C_u$	v	$\sigma_v$	$C_v$		
Иваньковское водохранилище									
4/VII	1,8	4,7	1,86	0,39	2,43	1,37	0,56	5,3	63
5		2,4	2,17	0,92	1,2	2,34	1,96	2,6	62
6		4,3	4,12	0,95	2,7	3,23	1,21	5,1	58
7		-0,3	5,90	17,8	-0,8	5,63	6,71	0,9	201
8		1,9	6,00	3,13	1,0	6,06	6,14	2,2	62
9		1,8	3,52	1,98	1,3	3,17	2,47	2,2	54
10		3,8	4,88	1,27	2,8	6,43	2,28	4,7	54
4-5	5,0	3,4	2,14	0,63	0,4	0,90	2,10	3,4	83
4-5	10,0	3,5	5,13	1,46	0,7	6,16	8,35	3,6	79
4	14,0	6,5	1,40	0,21	-0,1	2,30	23,0	6,5	91
5		3,3	2,60	0,79	0,4	2,30	5,75	3,2	83
6		4,9	5,20	1,06	-0,4	3,00	7,50	4,9	95
7		6,3	6,20	0,98	0,8	6,20	7,75	6,3	83
8		0,1	5,20	52,4	0,04	6,10	152,5	0,06	39
4-8		4,4	5,00	1,14	0,17	4,20	24,7	4,4	87
Рыбинское водохранилище									
11/VIII	2,0	-0,9	0,7	0,78	-6,7	2,57	0,38	6,8	188
12		0,5	2,58	5,16	-10,7	7,95	0,74	11,0	176
13		2,2	1,85	0,84	-17,1	5,51	0,32	17,2	172
14		0,5	1,09	2,18	-6,4	2,61	0,40	6,4	176
15		-0,6	0,97	1,61	-3,1	2,64	0,85	3,2	191
16		0,3	0,30	1,00	-4,2	2,44	0,54	4,2	176
17		0,02	1,82	91,0	-1,4	2,13	1,52	1,4	180
18		-1,0	2,45	2,45	1,3	1,14	0,82	1,6	322
11-18		0,1	1,91	19,30	-6,0	6,64	1,11	6,1	179
25/VI	5,0	-2,2	5,27	2,39	4,0	3,22	0,80	4,6	331
29/X	4,0	1,6	5,63	3,52	1,0	8,43	8,43	1,9	58

нальной составляющей ( $C_v$ ). Это говорит о большей устойчивости течения в направлении транзитного расхода.

Дополнительные сведения о структуре течений в водоеме дает автокорреляционный анализ, который показывает, что роль пульсаций скорости при больших периодах осреднения велика и они могут

**Статистические характеристики течения на мелководье Волжского плеса  
Рыбинского водохранилища**

Дата	Составляющая на параллель			Составляющая на меридиан			V см/с	$\alpha^\circ$
	u	$\sigma_u$	C <sub>u</sub>	v	$\sigma_v$	C <sub>v</sub>		
22/VI	1,00	1,73	1,81	1,0	7,07	4,45	1,9	32
23	0,09	1,06	1,21	-0,90	4,04	4,47	1,3	135
24	0,80	1,03	1,28	-2,10	3,08	1,47	2,3	159
25	0,80	1,10	1,37	0,80	4,90	5,97	1,1	45
26	0,4	0,96	2,57	-1,00	4,36	4,55	1,1	158
27	0,60	0,82	1,36	-0,40	3,24	8,87	0,7	124
28	0,40	1,96	4,68	-0,04	12,7	2,94	0,4	96
29	-0,20	1,36	6,00	-2,8	7,04	2,51	2,8	184
30	-0,80	0,92	1,19	-3,7	2,81	0,76	3,8	192
1/VII	-0,40	1,38	3,95	-0,60	5,99	9,88	0,7	214
2	-1,20	1,03	0,84	-8,9	4,10	0,46	9,0	188
3	-1,60	1,49	0,92	-7,6	4,41	0,58	7,8	192
4	-1,10	0,72	0,68	-4,8	2,75	0,58	4,9	193
5	-0,50	0,69	1,32	-4,1	1,74	0,42	4,1	187
6	-0,03	0,82	24,6	-2,3	0,84	0,37	2,3	180
7	0,80	0,73	0,93	0,12	1,71	14,6	0,8	81
8	0,90	0,71	0,82	1,00	1,30	1,22	1,3	41
9	0,80	0,52	0,68	1,9	1,19	0,61	2,1	23
10	0,80	0,69	0,81	-0,90	1,43	1,60	1,2	138
11	0,40	1,00	2,42	-1,1	1,95	1,71	1,2	160

преобладать над упорядоченным переносом. Основная часть энергии пульсаций скорости приходится на низкие частоты с периодом более суток (рис. 3). Это связано с тем, что наибольший вклад в отклонения от средних вносят изменения скорости, вызванные крупномасштабными вихревыми образованиями, обусловленными сменой синоптических ситуаций над акваторией водоема. Кроме длиннопериодных колебаний в автокорреляционных функциях проявляются и колебания с периодами от одного до нескольких часов. Наиболее четкие синусоидальные колебания с периодом в 5 часов (рис. 3б) наблюдались на мелководье Волжского плеса Рыбинского водохранилища и, очевидно, связаны со свободными колебаниями водной массы (типа сейшевых) на этом участке.

Анализ автокорреляционной функции позволяет оценить очень важную характеристику структуры течений — размер вихревых образований и их устойчивость. Средний размер таких образований

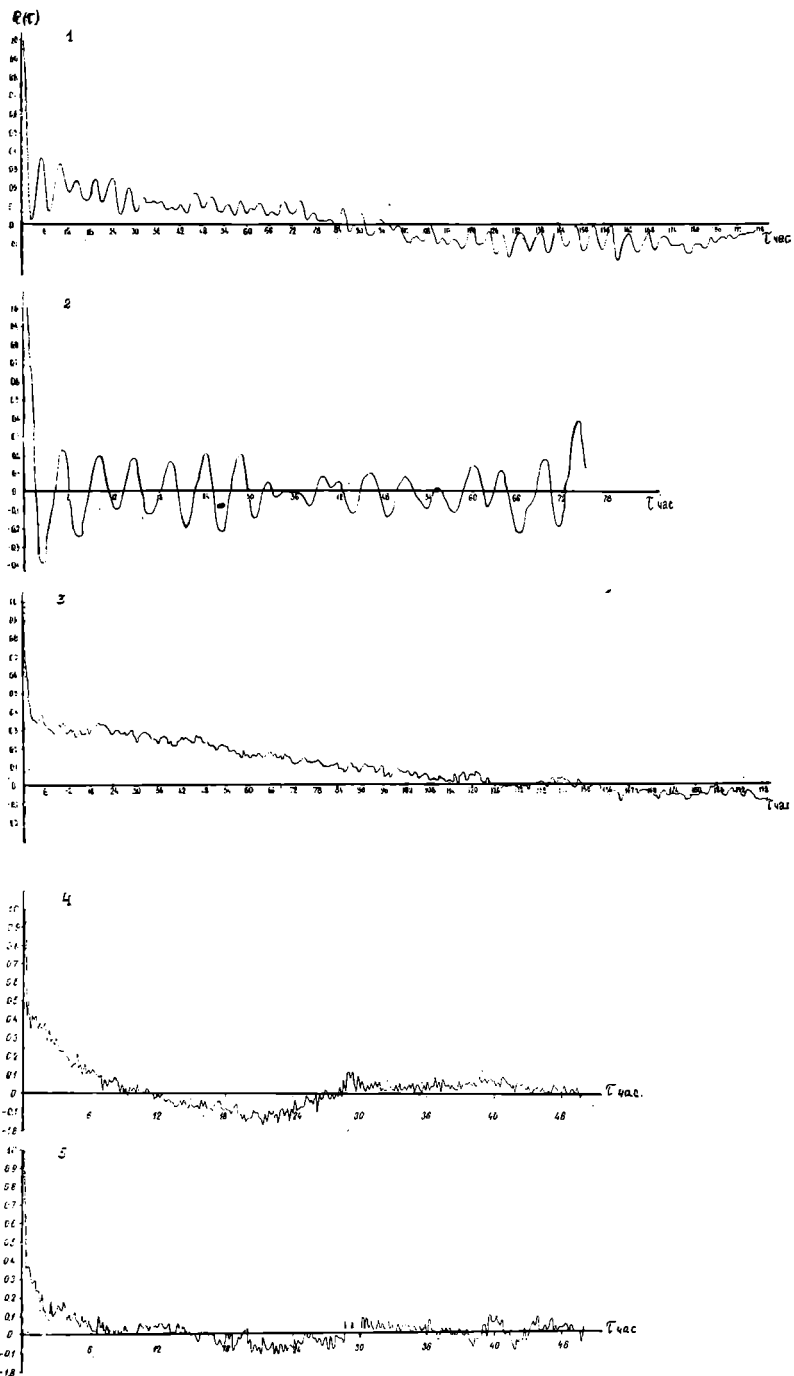


Рис. 3. Автокорреляционные функции составляющих скоростей течения в безледный период

1 — Рыбинское водохранилище, составляющая на меридиан, 2 — составляющая на меридиан, начальный момент отсчетов 190 член ряда, 3 — составляющая на параллель, 4 — Иваньковское водохранилище, Корчева, составляющая на меридиан, 5 — составляющая на параллель. По оси абсцисс — периоды, по оси ординат — значения автокорреляционной функции

для Иваньковского водохранилища по параллели составляет 300—500 м (в направлении осредненного течения), а по меридиану 100—300 м (поперек осредненного течения), что говорит об их анизотропии. Продолжительность их существования в среднем 10—12 часов. При штормовых ситуациях размеры вихрей могут значительно превышать указанные и быть соизмеримы с линейными размерами самого водохранилища. В Рыбинском водохранилище размеры вихревых образований могут достигать нескольких километров, а продолжительность их существования измеряется десятками часов. Наличие на автокорреляционных функциях колебаний с периодами менее суток говорит о существовании и значительно более мелких, турбулентных образований, размеры которых измеряются десятками и сотнями метров, а продолжительность существования часами и даже минутами. Однако энергия пульсации скорости, заключенная в таких образованиях значительно меньше, чем в крупномасштабных вихрях. Наличие крупномасштабных вихрей в водоеме может объяснить пространственную структуру полей гидрологических и гидрохимических характеристик, а также пятнистость в распределении пассивных форм гидробионтов по акватории водоема.

Применение статистической теории турбулентности при исследовании структуры течений в водоеме позволяет вычислить характеристики горизонтального макротурбулентного обмена, что имеет важное практическое значение. Методика вычисления коэффициентов обмена, а также их характеристики для Рыбинского водохранилища приведены ранее [2]. Здесь мы остановимся только на характеристике горизонтального макрообмена в Иваньковском водохранилище (табл. 5).

Таблица 5

Характеристики коэффициента горизонтального турбулентного обмена в Иваньковском водохранилище (  $\cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  )

Горизонт, м	$A_{\varphi} \cdot 10^6$	$A_{\lambda} \cdot 10^3$	$A_{\varphi\lambda} \cdot 10^3$	$A_{\lambda\varphi} \cdot 10^3$
2	0,098	0,129	0,071	0,054
10	0,049	0,037	—0,012	—0,012
14	0,014	0,096	—0,003	—0,014

Максимальные значения коэффициентов обмена наблюдаются в поверхностном слое, с глубиной они заметно убывают. Четко прослеживается анизотропия обмена: обмен в направлении осредненного переноса вод значительно больше обмена в направлении перпендикулярном транзитному расходу. Величины коэффициентов горизонтального турбулентного обмена в Иваньковском водохранилище меньше значений таковых в Рыбинском водохранилище.

Ввиду существенных изменений среднесуточных скоростей течения (см. табл. 3), коэффициенты макрообмена, вычисленные по от-

клонениям от среднесуточных значений скорости, не остаются постоянными (рис. 4). При этом следует отметить, что величина коэффициентов не столько зависит от абсолютной величины средней скорости течения, сколько от интенсивности турбулентности или, иначе говоря, от величины коэффициента вариации ( $C$ ) составляющих скорости.

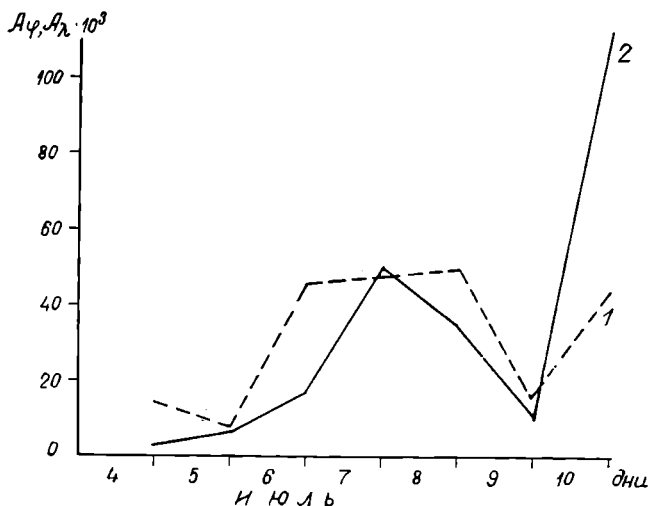


Рис. 4. Ход во времени коэффициентов макрообмена в Ивановском водохранилище  $A_\varphi$  (1);  $A_\lambda$  (2) на горизонте 2 м.  
По оси абсцисс — дата, по оси ординат — значения  $A_\varphi$  и  $A_\lambda$   
( $\text{г} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot 10^3$ )

Значения коэффициентов горизонтального макрообмена в значительной степени также зависят от периода осреднения, который косвенно выражает масштаб явления. Последний, в свою очередь, теснейшим образом связан со сложным спектральным составом полей гидрологических характеристик. Например, если бы пульсации скорости имели лишь один период, то осреднение с любым периодом, большим периода пульсации, не приводило бы к изменению средних скоростей и величин среднеквадратических отклонений. При наличии в поле скорости пульсации с самыми различными периодами, каждый новый период осреднения приведет к новым характеристикам турбулентности.

На рис. 5 приведена зависимость коэффициентов горизонтального макрообмена для горизонта 2 м в Ивановском водохранилище от периода осреднения  $T_0$ . При вычислении  $A_\varphi$  и  $A_\lambda$  за  $T_0$  брались значения 2, 4, 6, 8, 10, 12, 18, 24, 36, 48 часов. Для отделения в исходной кривой составляющих с периодами большими  $T_0$  функция  $u(t)$  подвергалась фильтрации. Фильтрация проводилась с учетом весов отдельных членов, входящих в интервал осреднения [9]. Такой

фильтр имеет лучшую спектральную характеристику, чем простое скользящее осреднение.

Приведенные данные показывают, что наиболее интенсивное увеличение коэффициентов обмена наблюдается в первые моменты времени. С увеличением периода осреднения скорость возрастания коэффициентов уменьшается. Кроме того, если при  $T_0$  менее 12 часов коэффициенты обмена как по параллели, так и по меридиану имеют одну и ту же величину, то с ростом периода осреднения отмечается более интенсивное увеличение коэффициентов обмена по параллели, чем по меридиану. Это ещё раз подтверждает положение об анизотропии крупномасштабных вихрей.

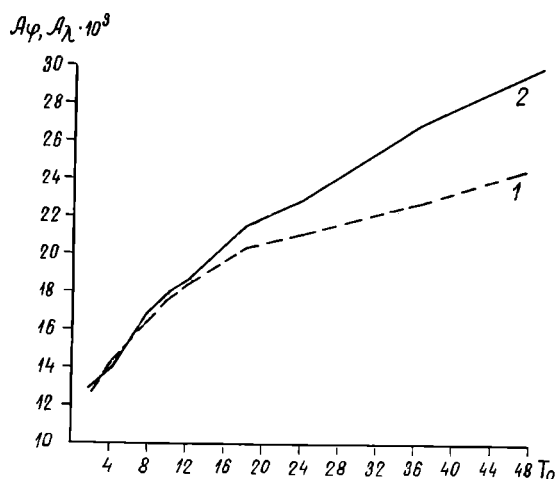


Рис. 5. Зависимость коэффициентов макрообмена  $A_\varphi$  (1) и  $A_\lambda$  (2) от периода осреднения  
По оси абсцисс — период осреднения ( $T_0$ , часы), по оси ординат значения  $A_\varphi$  и  $A_\lambda$  ( $\text{ч} \cdot \text{см}^{-1} \cdot \text{сек}^{-1} \cdot 10^3$ )

Расчет основных характеристик турбулентности при использовании целого набора периодов осреднения может дать представление о распределении энергии по разномасштабным движениям в водоеме. Однако в настоящее время таких наблюдений над характеристиками течений в водохранилищах не имеется.

Из изложенного следует, что среднесуточные скорости течения, характеризующие перенос вод, как в зимний, так и в летний период значительно меньше мгновенных скоростей. В безледный период на большей площади Рыбинского водохранилища результирующий перенос вод формируется под воздействием ветра. В Ивановском водохранилище в течение всего года результирующий перенос направлен к плотине Ивановского гидроузла. Только в поверхностном слое при устойчивых ветрах восточной четверти он может иметь противоположное направление.

Основная часть энергии пульсаций скорости заключена в крупномасштабных вихревых образованиях. В Иваньковском водохранилище и в плесовых участках Рыбинского водохранилища эти вихри вытянуты вдоль берега.

Анизотропия крупномасштабных вихрей приводит к анизотропии и коэффициентов горизонтального макрообмена. При уменьшении горизонтальных масштабов до 100 м и менее коэффициенты обмена становятся изотропными. В связи с изменением скоростей среднесуточного переноса вод и значений коэффициентов вариации скорости, наблюдается большая изменчивость среднесуточных значений коэффициентов обмена.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Буторин Н. В., Литвинов А. С. О течениях в Рыбинском водохранилище. В кн.: Биологические аспекты изучения водохранилищ. Л., 1963, с. 270—302.
2. Буторин Н. В., Литвинов А. С. Расчет коэффициентов турбулентного обмена в Рыбинском водохранилище. В кн.: Биологические и гидрологические факторы местного перемещения рыб в водохранилищах. Л., 1968, с. 250—258.
3. Исследование течений в озерах и водохранилищах. Л., 1972, 318 с.
4. Литвинов А. С. Некоторые данные о ветровых течениях в Рыбинском водохранилище. В кн.: Гидрометеорологический режим верхневолжских водохранилищ. Л., 1966, с. 83—91.
5. Литвинов А. С. О распространении волн попусков в нижнем бьефе Угличской ГЭС. Информ. бюлл. «Биол. внутр. вод», 1968, № 2, с. 26—30.
6. Литвинов А. С. Об измерении течений в водохранилищах самописцами БПВ-2р. В кн.: Биологические и гидрологические факторы местного перемещения рыб в водохранилищах. Л., 1968, с. 259—268.
7. Литвинов А. С., Бакулин К. А. Динамика вод Волжского плеса Рыбинского водохранилища в зимний период. В кн.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения. Л., 1968, с. 100—119.
8. Литвинов А. С., Ярославцев Н. А. Течения. В кн.: Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища верхней Волги. Л., 1975, с. 120—141.
9. Озмидов Р. В. Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в океане. М., 1968, 196 с.

✍

О. Ф. Кондрацова

## Исследование связи стока рек с атмосферными осадками

Среди факторов формирующих сток рек и его колебания, главная роль, как правило, отводится атмосферным осадкам. Данное исследование выполнено с целью определить степень зависимости стока рек центральной части ЕТС от количества атмосферных осадков, выпадающих над этой территорией, получить количественную характеристику связи между рассматриваемыми элементами.

В предыдущих исследованиях было установлено, что основной закономерностью в распределении осадков над ЕТС является их зональная асинхронность между крайним северным и южными районами. Изменения осадков во времени помимо случайных колебаний содержат циклические составляющие с периодами порядка 2, 3, 8 и 40—50 лет. При этом одно из ведущих мест в изменениях осад-

ков занимает 2-летняя вариация и особенно это характерно для сумм осадков за летний период. В осадках холодного периода 2-летняя вариация развивается на фоне более характерной для этого времени года 40—50-летней циклической составляющей. В годовых суммах осадков главная роль принадлежит 3-летней вариации, затем по степени убывания значимости идут 2-, 40—50- и 8-летняя.

О стоке рек известно, что его колебания на ЕТС происходят асинхронно колебаниям Азиатской территории Союза [3, 5, 9]. Однако подробно исследованиями колебаний стока рек непосредственно ЕТС никто не занимался. Имеются лишь данные по бассейну Волги [7, 8], из которых следует, что изменчивость стока Волги, так же, как и атмосферных осадков, характеризуется детерминированными составляющими с периодами около 3, 8, 10, 14, 17—19, 21 года и вековым трендом. Уменьшение или увеличение стока в большинстве случаев происходит по всему бассейну одновременно (54% дисперсии). Этот типичный характер изменения водности Волги изредка нарушается изменением стока с запада на восток (около 20% дисперсии). Значительно реже отмечаются случаи изменения стока с севера на юг (8,1%). Рассматривая даже эти разрозненные данные об изменениях стока рек и атмосферных осадков можно заметить некоторые общие черты в их распределении по территории и изменениях во времени.

Исследование связи стока рек с атмосферными осадками в данной работе выполнено при помощи метода разложения полей стока и атмосферных осадков по естественным ортогональным функциям. Район исследований охватывает территорию предполагаемой переброски стока северных рек ЕТС через Волгу на юг и сам бассейн Волги. Эта территория соответствует шести районам Ф. З. Батталова (2, 6, 7 а, 7 б, 8 и 9), который выполнил районирование территории ЕТС по характеру многолетних колебаний атмосферных осадков над ней [1].

Годы исследования совпадают с периодом относительно слабого влияния на сток рассматриваемых рек антропогенных факторов (1933—1962). Для характеристики режима осадков использованы данные Ф. З. Батталова [1] по средним для районов значениям модульных коэффициентов осадков за теплый период года, за холодный период года и за год в целом. Режим стока представлен средними годовыми значениями расходов воды на 12 замыкающих створах рек. Реки отобраны таким образом, чтобы каждый район с осадками был представлен двумя речными бассейнами (табл. 1).

Разложению подвергнуты четыре матрицы, из которых три имеют размерность  $6 \times 30$  (осадки) и одна —  $12 \times 30$  (сток).

Прежде всего следует отметить, что выполненное разложение полей стока и осадков имеет хорошую устойчивость. Об этом говорит совпадение результатов настоящего разложения с результатами разложения полей стока и осадков, произведенного ранее по иным наборам параметров и для других целей [4, 8]. Устойчивость же разложения, как известно, свидетельствует об устойчивости, обнаруженных закономерностей, о реальности выявленных процессов. Сле-



## Характеристика используемых створов

Река, створ	№ р-на	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Средний многолетний расход, м <sup>3</sup> /сек
1. Сев. Двина, Усть Пинега	2	348000	3165
2. Печора, Усть Шугор	2	67500	1038
3. Ока, Калуга	6	54900	282
4. Москва, Звенигород	6	5000	33
5. Ветлуга, г. Ветлуга	7а	22400	192
6. Вятка, Вятские Поляны	7а	124000	830
7. Цна, Княжево	7б	13600	46
8. Мокша, Шевел. Майдан	7б	28600	94
9. Сура, Кадышево	8	27900	97
10. Свияга, Ивашевка	8	8300	21
11. Б. Кинель, Тимашево	9	12000	32
12. Самара, Елшанка	9	22800	47

дующим моментом, на который необходимо обратить внимание, является сходство между собою полученных естественных составляющих стока и атмосферных осадков. Отмеченное справедливо, по крайней мере, для первых 3-х главных составляющих. Конфигурация полей соответствующих векторов стока и осадков почти полностью повторяет одна другую. Такое сходство между полями главных компонент стока и осадков дает основание предположить вполне определенную связь между рассматриваемыми элементами, их генетическую зависимость друг от друга. Существенные различия между полями обнаруживаются начиная с 3-го вектора.

Результаты разложения характеризуются высокой сходимостью, особенно по осадкам холодного периода: около 81% суммарной дисперсии сосредоточено в первых двух коэффициентах разложения (табл. 2). Высокая сходимость говорит об относительной однородности изменений рассматриваемых элементов по территории, ограниченной поставленной задачей. Распределение коэффициентов разложения в полях первого вектора, на долю которого приходится от 45% дисперсии в стоке рек до 58% дисперсии в осадках холодного периода указывает на то, что и сток, и осадки изменяются в пределах исследуемого района довольно однообразно (рис. 1). Уменьшение или увеличение и стока, и осадков происходит по всему полю одновременно, и величина изменения относительно общей дисперсии колеблется незначительно.

В полях второго вектора, описывающего от 16,2% дисперсии в изменчивости стока до 23,6% дисперсии в изменчивости годовых сумм осадков уже видна некоторая территориальная разнородность в режиме рассматриваемых элементов при относительном сходстве меж-

## Сходимость разложения полей стока рек и атмосферных осадков

Осадки				Сток			
j	$\lambda_j$	$\lambda_j / \Sigma_1^6 \lambda_j ; \%$	$\Sigma_1^6 \lambda_j / \Sigma_1^6 \lambda_j ; \%$	j	$\lambda_j$	$\lambda_j / \Sigma_1^{12} \lambda_j ; \%$	$\Sigma_1^{12} \lambda_j / \Sigma_1^{12} \lambda_j ; \%$
1	2,983	49,73	49,7	1	5,412	40,10	45,1
2	1,420	23,65	73,4	2	1,946	16,22	61,3
3	0,675	11,24	84,6	3	1,342	11,19	72,5
4	0,481	8,01	92,6	4	1,197	19,98	82,5
5	0,283	4,72	97,4	5	0,687	5,72	88,2
6	0,159	2,65	100	6	0,567	4,72	92,9
Теплый период				7	0,294	2,45	95,4
1	3,290	54,83	54,8	8	0,188	1,57	97,0
2	1,272	21,21	76,0	9	0,176	1,47	98,4
3	0,567	9,45	85,5	10	0,116	0,97	99,4
4	0,419	6,98	92,5	11	0,042	0,35	99,7
5	0,292	4,86	97,2	12	0,032	0,26	100
6	0,160	2,67	100				
Холодный период							
1	3,506	58,43	58,4				
2	1,349	22,48	80,9				
3	0,530	8,83	89,7				
4	0,373	6,23	96,0				
5	0,151	2,51	98,5				
6	0,092	1,52	100				

ду собою. Главной закономерностью полей второго вектора представляется изменение стока с СЗ на ЮВ и осадков с С на Ю. Все четыре поля этого вектора, (одно со стоком и три с осадками) обнаруживают тенденцию к асинхронности колебаний указанных элементов. Линия раздела между асинхронными зонами проходит в поле осадков по Оке и Каме, отсекая бассейны правых притоков Оки и левых притоков Камы от более северных районов. В поле стока она проходит также по Оке, разделяя правые и левые ее притоки затем, поднимаясь севернее, оставляет справа весь бассейн Камы. В поле второго вектора так же, как и первого, сток и осадки мало различаются по форме пространственного распределения.

Вклад в характеристику режима стока и осадков полей 3-го вектора мал. Он определяется всего 9—11% дисперсии. Однако на этом уровне изменения стока и осадков значительно меньше похожи друг на друга. Так поле стока имеет 2 асинхронные общему ходу зоны: одну в бассейне Оки (р-н Среднерусской возвышенности и Окско-

Донской равнины), другую в бассейне левых притоков Камы и Нижней Волги (р-н Общего Сырта). Это значит, что повышение стока в бассейне Печоры и Сев. Двины сопровождается его понижением в бассейнах Оки и правых притоков Камы и Нижней Волги. Осадки имеют также две линии перехода через «О», но только в холодную половину года. Одна из них оконтуривает бассейны Цны, Мокши, Суры, Свияги (р-н Окско-Донской равнины и Приволжской возвышенности); другая, проходя по Северным Увалам, — р-н северных

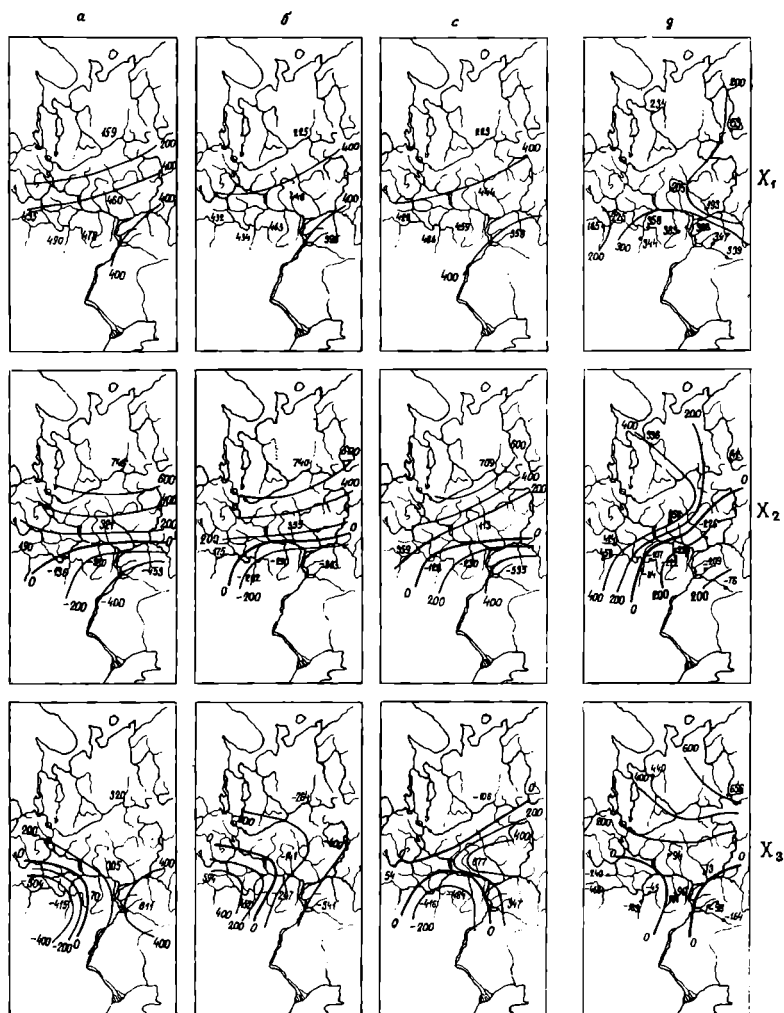


Рис. 1. Поля трех первых собственных векторов разложения ( $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ) атмосферных осадков за год — а, за теплый период — б, за холодный период — в и стока рек — д

рек (р-н 2). Осадки теплого периода и за год в целом сохраняют только одну зону с асинхронным общему ходу режимом: ту, что расположена в бассейне Оки на Среднерусской возвышенности и Окско-Донской равнине (р-ны 6, 7 б). Иными словами и по осадкам, и по стоку рек асинхронным оказывается только р-н, расположенный в бассейне Оки. Таким образом, более подробное рассмотрение полей главных векторов разложения подтверждает предположения о достаточно тесной зависимости стока от атмосферных осадков.

Изменения стока и атмосферных осадков во времени, а также их связь между собою были проанализированы с помощью спектрального анализа временных коэффициентов разложения. Спектры 30-летних рядов, рассчитанные в условной частоте при сдвиге до 12 членов, позволяют судить о спектральной плотности рассматриваемых величин в диапазоне от 3 до 12—14 лет. За пределами этого диапазона спектрограммы указывают только на возможную тенденцию в развитии процесса.

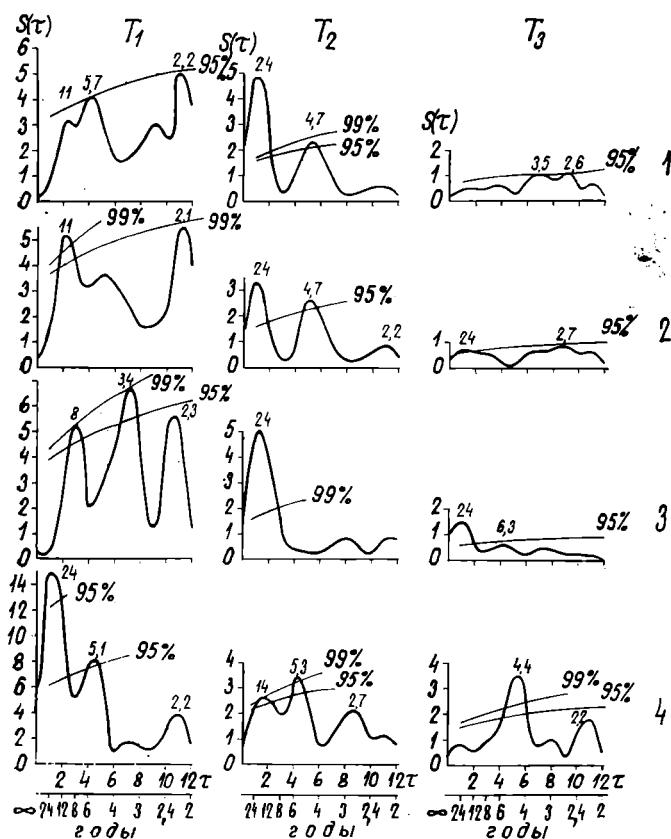


Рис. 2. Спектрограммы временных коэффициентов разложения ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) атмосферных осадков за год — 1, за теплый период — 2, за холодный период — 3 и стока рек — 4

На рис. 2 приведены спектрограммы временных коэффициентов разложения  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  стока и осадков. Из рисунка следует, что для рассматриваемого района, как и для ЕТС в целом [4], характерно наличие в многолетнем ходе стока рек и атмосферных осадков циклических составляющих. Циклами имеющими 95—99% обеспеченность в осадках представляются: для полей I вектора 11-летний (в осадках теплого периода), 5-летний (в годовых суммах осадков), 8 и 3-летние (в осадках холодного периода). Кроме того все спектрограммы указывают на тенденцию к 2-летнему циклу. Для полей II-го вектора наиболее характерна цикличность в 24 года, а также 4-летняя (для годовых сумм осадков и осадков теплого периода). Двухлетняя проявляется только в виде тенденции. В полях III-го вектора сохраняется 24-летняя вариация в сезонных осадках, а в годовых 3 и 2-летняя, в данном случае с 95% обеспеченностью.

Общими и для стока и для осадков в рассматриваемом районе представляются циклы 4—5 лет, солнечнообусловленный 11-летний цикл, который в стоке рек бассейна Волги проявляется как 14-летний, о чем указывалось ранее [7], 24-летний и 2-летний. Низкая обеспеченность квазидвухлетнего цикла, как уже говорилось, объясняется недостаточной разрешающей способностью исходного материала. Для более точного определения его максимальной спектральной плотности и периода, нужны данные со среднемесячной дискретностью наблюдаемых величин. Однако, наличие этой вариации на всех рассмотренных спектрограммах стока и осадков говорит о ее реальности. Подробно эта составляющая в многолетних колебаниях стока рек СССР и атмосферных осадках над ЕТС уже рассматривалась [4, 5]. Известны в литературе также 5- и 24-летние циклы в колебаниях атмосферных осадков на отдельных территориях [6, 10].

Таким образом, общие черты в режиме стока рек и атмосферных осадков видны и в изменчивости этих характеристик во времени.

Для количественного выражения связи между полями атмосферных осадков и стока рек был использован взаимокорреляционный анализ. Временные коэффициенты каждого из 4-х первых векторов разложения осадков за теплую половину года, за холодную половину года и за год в целом были прокоррелированы с временными коэффициентами каждого из первых 4-х векторов разложения стока рек. Коэффициенты корреляции оказались не высокими, но в ряде случаев значимыми. Так между коэффициентами разложения I вектора годовых сумм осадков и II вектора стока  $r=0,55$ ; между II-ми векторами годовых сумм осадков и стока  $r=0,47$ ; между I вектором осадков теплого периода и II вектором стока  $r=0,46$ ; а между II вектором осадков холодного периода и I вектором стока связь отрицательная  $r=-0,41$ . Асинхронность между колебаниями стока и осадков явление весьма интересное и требует специального исследования. В литературе оно отмечено, например, в зонах орошения, расположенных в южных частях бассейнов всех рек юго-запада ЕТС [2] и в бассейнах ряда рек Днепропетровской области [11]. Причины этого явления, как пишет Е. А. Топчиев, сложны и должны быть исследованы специально. Автор указывает лишь на то, что колебания осад-

**Максимальные коэффициенты корреляции между стоком рек  
и атмосферными осадками**

Река	Осадки		r
	№ р-она	период наблюдения	
1. Сев Двина	2	год	0,61
	2	теплый	0,68
2. Печора	7a	год	0,45
	8	год	0,50
	8	теплый	0,49
3. Москва	6	год	0,52
	6	теплый	0,49
4. Ока	6	год	0,52
5. Ветлуга	7a	год	0,60
	7a	теплый	0,53
6. Вятка	9	холодный	0,54
7. Мокша	7б	холодный	0,52
	8	холодный	0,51
8. Цна	7б	холодный	0,43
9. Сура	8	холодный	0,51
10. Свияга	9	холодный	0,46
11. Самара	9	холодный	0,49
12. Б. Кинель	9	холодный	0,43

ков, выпадающих над данной территорией определяются процессами, формирование которых происходит за пределами этой территории, в то время, как колебания стока в значительной степени зависят от местных условий. И в тех районах, где коэффициент стока мал, изменения местных условий формирования стока, особенно весеннего, могут оказывать существенное влияние на его величину вне связи с колебаниями осадков.

Более высокие коэффициенты корреляции получились между осадками, осредненными по районам, и натурными рядами наблюдений за расходами воды. Анализ этих взаимокорреляционных связей обнаружил следующие закономерности. Во-первых, коэффициенты корреляции имеют самые большие значения при нулевом сдвиге стока по отношению к осадкам. Во-вторых, как и следовало ожидать, сток реки лучше всего связан с осадками, выпавшими в ее бассейне или районе, расположенном рядом. В-третьих, реки северной части рассматриваемого района, включая верховье Оки (Калуга) и ее левые притоки, а также Ветлугу и Вятку, наиболее тесно связаны с годовыми суммами осадков и осадками теплого периода; реки же более южных районов (Цна, Мокша, Сура, Свияга, Б. Кинель и Са-

мара) — с осадками холодного периода (табл. 3). Объяснение этому, очевидно, следует искать в способах питания водосборов. Все рассматриваемые реки относятся к типу рек с преимущественно снеговым питанием. Однако, согласно классификации Львовича, реки первой группы имеют в летнем питании значительную дождевую составляющую, тогда как у рек второй группы эта составляющая уступает место грунтовой. Кроме того, согласно недавно вышедшей монографии Ц. А. Швер [12], реки второй группы примыкают к району с зимним максимумом осадков.

Таким образом, многолетние колебания стока рек и атмосферных осадков над северным и центральными районами ЕТС имеют сходные черты. Это находит свое отражение в одинаковом ходе изменений стока и осадков по территории, в наличии близких по продолжительности циклических составляющих и в относительно высоких коэффициентах корреляции между рядами стока и атмосферных осадков.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Батталов Ф. З. Многолетние колебания атмосферных осадков и вычисление норм осадков. Л., 1968, 183 с.
2. Железняк И. А., Швейник Ю. В. Асинхронность осадков и стока и ее учет при расчете водного и водохозяйственного балансов для больших территорий. Тр. IV Всес. гидрологич. съезда, т. 3, Л., 1975, с. 241—249.
3. Калинин Г. П., Давыдова А. И. Циклические колебания стока рек северного полушария. В кн.: Проблемы речного стока. М., 1968, с. 9—23.
4. Кондрацова О. Ф. О двухлетней составляющей в многолетнем ходе атмосферных осадков. Информ. бюлл. «Биол. внутр. вод», 1977, № 35, с.
5. Кондрацова О. Ф., Смирнов Н. П. Колебания стока рек СССР и квазидвухлетний стратосферный цикл. В кн.: «Факторы формирования водных масс и районирование внутренних водоемов. Л., 1974, с. 39—67.
6. Кудрявцева Л. А. К вопросу об исследовании 20—24-летнего цикла в ходе характеристик атмосферной циркуляции и осадков. В кн.: «Общая и синоптическая климатология. Л., 1973, с. 106—115.
7. Саруханян Э. И., Смирнов Н. П. Многолетние колебания стока Волги. Л., 1971, 1965, с.
8. Смирнов Н. П., Кондрацова О. Ф. Исследование многолетних колебаний стока Волги с помощью разложения по естественным составляющим. В кн.: «Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Л., 1972, с. 128—146.
9. Сомов Н. В. Асинхронность и цикличность колебаний стока крупных рек СССР. Тр. ЦИП, 1963, вып. 117, с. 180—214.
10. Сорокина Н. М. Многолетние колебания осадков холодного периода в лесостепной части Приволжской возвышенности. Докл. Пенз. Геогр. об-ва СССР, М., 1973, с. 35—39.
11. Топчиев Е. А. Осадки и речной сток в степной зоне Украины. Водные ресурсы. 1975, № 3, с. 70—73.
12. Швер Ц. А. Атмосферные осадки на территории СССР. Л., 1976, 302 с.

*Н. А. Зиминова*

### **Влияние верхневолжских водохранилищ на состав стока взвешенных веществ Волги**

В обширной литературе, посвященной влиянию водохранилищ на окружающую среду, вопросы изменения качественной специфики процесса стока под влиянием регулирования занимают довольно

скромное место. Между тем, в пределах водохранилищ специфика процесса стока, заключающаяся в способности качественно преобразовывать переносимые вещества, проявляется более отчетливо, чем в реках. Факторами, определяющими изменение в свойствах и составе стока, являются уменьшение интенсивности водообмена, с которым связан транзит или аккумуляция веществ в водоеме, и развитие внутриводоемных процессов. Действие этих факторов приводит к седиментации речных взвесей, поступающих в водоем, образованию в нем автохтонных взвесей, биохимическим и физико-химическим превращениям алло- и автохтонного вещества. Совокупное действие указанных процессов изменяет количество и состав взвешенных веществ, переносимых стоком.

Наличие количественной трансформации стока взвешенных веществ при регулировании общеизвестно, и для многих водоемов произведены ее оценки. Вопрос о влиянии регулирования на состав стока взвешенных веществ не исследован. Цель настоящей работы заключалась в выяснении влияния верхневолжских водохранилищ на состав стока взвешенных веществ, в частности, на содержание во взвесах углерода, азота и фосфора, как элементов, являющихся главными компонентами питательных веществ в водоемах. Для этого сопоставлялся состав стока взвешенных веществ, поступающих с речными водами или из вышерасположенного водохранилища, и сбрасываемых в нижний бьеф. Такое сопоставление позволяет оценить влияние регулирования, если в водохранилище не происходит поступления значительных количеств антропогенных взвешенных веществ.

Работа выполнялась в 3 последовательных этапа, во время которых поставленная задача решалась применительно к Ивановскому, Угличскому и Рыбинскому водохранилищам. Сроки, пункты и количество наблюдений приводятся в табл. 1. Пробы на незарегулированных участках рек отбиралась на середине русла с горизонта 0,6 глубины, на водохранилищах — с горизонта 0,5 глубины, в створах ГЭС — в водоводах турбин. В пробах определялось общее количество взвесей, углерод, общий и карбонатный, органический азот, общий фосфор, перманганатная окисляемость фильтрованной воды. Методика определения изложена ранее [12]. Для ориентировочных расчетов стока растворенного органического вещества отношение кислорода перманганатной окисляемости к органическому углероду в фильтрованной воде принято равным 1 [15]. В работе использованы также материалы 1967—68 гг., полученные при изучении стока взвешенных веществ в створах верхневолжских ГЭС и малых притоков Рыбинского водохранилища. Содержание органического вещества во взвесах в пробах этих лет определялось по потере при прокаливании. Для перехода к органическому углероду применялся коэффициент 0,58.



## Сведения о количестве наблюдений над составом взвесей

Год	Пункты наблюдений	Количество наблюдений		
		всего	в поло- водье	в межень
1971	р. Волга — г. Ржев	17	10	7
1971	р. Волга — г. Старица	7	—	7
1971	р. Волга — г. Калинин	7	—	7
1972	р. Волга — г. Калинин	10	5	5
1972	р. Тверца — д. Долматово	7	2	5
1972	Иваньковское водохранилище — с. Городня	5	—	5
1972	Иваньковское водохранилище — Без- бородовский мост	5	—	5
1972	Иваньковское водохранилище — Иваньковская ГЭС.	10	5	5
1973	Иваньковское водохранилище — г. Калинин, с. Городня, Безборо- довский мост, Скрылево, Корчева, верх. бьеф Иваньковской ГЭС	6	—	6
1973	Угличское водохранилище — Углич- ская ГЭС	16	6	10
1973	р. Молога — г. Устюжна	12	6	6
1974	Шекснинское водохранилище — Шекснинская ГЭС	15	6	9
1974	Рыбинское водохранилище — Ры- бинская ГЭС	12	4	8

**Влияние Иваньковского водохранилища на состав  
стока взвешенных веществ**

Водосбор Волги выше Иваньковского водохранилища занят ландшафтами моренных холмов и равнин, залесенность водосбора составляет 40%, на долю пашни приходится около 40% площади сельскохозяйственных угодий. Общеландшафтные условия определяют невысокую мутность речных вод. Средняя годовая мутность Волги и ее притоков выше Ржева не превышает 15 мг/л, средняя многолетняя расчетная мутность Волги у Калинина 20 мг/л. Годовой ход мутности типичен для равнинных рек: за апрель-май проходит около 80% годового стока взвесей. Средняя апрельская мутность воды Волги у Калинина в разные годы равнялась 30—70 мг/л, в остальное время мутность колеблется в пределах 2—12 мг/л.

Детальная характеристика сезонной динамики углерода, азота и фосфора во взвесах Волги выше водохранилища и в створе Иваньковской ГЭС дана в работах [7, 12]. Установлено, что абсолютное содержание взвешенных форм углерода, азота и фосфора в воде

Верхней Волги находится в четком соответствии с годовым ходом мутности. Процентное их содержание во взвесах минимально в период половодья и максимально — в меженные периоды. Органический углерод составляет от 5 до 35% сухого веса взвесей Волги у Калинина, его средняя годовая концентрация — 9%. Доля взвешенного органического вещества в общем годовом стоке органического вещества равна 22%. Содержание  $N_{\text{орг.}}$  во взвесах находится в пределах 0,3—3,2%, при средней годовой концентрации 0,9%. Общий фосфор составляет 0,15—0,5% (в среднем за год — 0,2%) сухого веса взвесей (табл. 2). Поскольку содержание биогенных элементов во взвешенных веществах р. Тверцы, дающей около 20% годового стока речных взвесей в Ивановское водохранилище, имеет тот же порядок, что и в волжских взвесах, а годовой сок взвешенных веществ Волги в Ивановское водохранилище в 3 раза больше годового стока взвесей Тверцы, годовые и сезонные концентрации орга-

Таблица 2

**Характеристика состава взвесей Волги у г. Калинина  
и Ивановской ГЭС в 1972 г.**

Характеристика		Зима (I—III, XII)	Весна (IV, V)	Лето (VI— VIII)	Осень (IX— XI)	За год
Сток взвесей, тыс. т	Калинин	2,41	97,5	12,2	1,22	113,3
	ГЭС	2,58	22,6	3,62	0,287	29,1
Мутность, мг/л	Калинин	3,5	52,8	11,3	3,5	29,0
	ГЭС	3,3	18,5	8,3	7,3	11,8
Сток органического углерода взвесей, тыс. т	Калинин	0,577	7,53	2,22	0,262	10,6
	ГЭС	0,679	3,14	0,849	0,048	4,72
Органический углерод, % % от веса взвесей	Калинин	24	8	18	21	9
	ГЭС	26	14	23	17	16
Взвешенный органический уг- лерод, мг/л	Калинин	0,8	4,1	2,0	0,8	2,7
	ГЭС	0,9	2,6	2,0	1,2	1,9
Сток органического азота взвесей, т	Калинин	41,7	705	278	26,6	1052
	ГЭС	44,8	239	73,7	7,17	364,7
Органический азот, % % от ве- са взвесей.	Калинин	1,7	0,7	2,3	2,2	0,9
	ГЭС	1,7	1,1	2,0	2,5	1,2
Взвешенный органический азот, мг/л	Калинин	0,06	0,38	0,26	0,08	0,27
	ГЭС	0,06	0,20	0,17	0,18	0,15
Сток общего фосфора взве- сей, т	Калинин	10,6	166	33,1	4,1	213,8
	ГЭС	13,4	84,3	15,9	0,9	114,5
Общий фосфор, % % от веса взвесей.	Калинин	0,4	0,2	0,3	0,3	0,2
	ГЭС	0,5	0,4	0,4	0,3	0,4
Взвешенный общий фосфор, мкг/л	Калинин	15	90	31	12	54
	ГЭС	17	69	37	23	46

нического углерода в суммарном стоке взвесей Волги и Тверцы близки к наблюдаемым в волжских взвесах [8]. Исходя из этого, показатели состава волжских взвесей могут быть использованы для характеристики состава общего стока речных взвесей, поступающих в водохранилище.

Поступление взвешенных веществ со сточными водами г. Калинина вызывает в меженный период увеличение концентрации общего фосфора во взвесах в верхнем участке Волжского плеса. Однако, это увеличение не выходит за пределы природных колебаний содержания фосфора во взвесах и является локальным. Возможное увеличение годовой концентрации взвешенного фосфора за счет взвесей сточных вод г. Калинина не превышает 15% [7].

Сезонные изменения содержания взвешенного углерода, азота и фосфора в воде, сбрасываемой из водохранилища, соответствуют изменениям мутности. Однако, амплитуда изменений мутности в створе ГЭС значительно меньше, чем в Волге. Это определяет и более узкие пределы колебаний содержания взвешенной формы элементов в воде, сбрасываемой из водоема (табл. 2).

Приводимые в табл. 2 показатели содержания углерода, азота и фосфора взвесей в воде получены в маловодный 1972 г. В средний по водности год водохранилище аккумулирует около 19% объема весеннего половодья. В 1972 г. в водохранилище аккумулировано 32% объема весеннего половодья. Меньшая проточность водоема весной обусловила более значительное, чем обычно, уменьшение весеннего пика мутности в створе ГЭС. В средний по водности год разница в содержании азота, углерода и фосфора взвесей в речных водах и сбрасываемых из водохранилища в весенний период будет меньше.

Характер сезонных изменений концентрации углерода во взвесах в створе ГЭС сходен с наблюдаемым на входном створе: минимальная концентрация углерода во взвесах приходится на пик половодья (7%), максимальная — на летнюю межень (29%). Содержание углерода во взвесах зимой близко к максимальным значениям (24%). Сезонный ход содержания азота и фосфора во взвесах в створе ГЭС более сглажен и не имеет резкого падения концентраций во время пика половодья, как это наблюдается в реке. Сопоставление результатов наблюдений, проведенных на входном и замыкающем створах свидетельствует, что при пропуске половодья концентрации углерода во взвесах в створе ГЭС в среднем в 1,8, азота — в 1,6, фосфора — в 2,4 раза больше, чем на входном створе [7].

В течение летне-осенней межени прослеживается тенденция к понижению содержания углерода, азота и фосфора во взвесах сброса по сравнению с речными при увеличениях мутности в створе гидроузла за счет взвесей взмучивания. Отношение C : N в сбрасываемых взвесах в этом случае остается довольно низким, что указывает на автохтонный характер органического вещества взвесей. Сопоставление годовых характеристик состава взвесей Волги у Калинина и Ивановской ГЭС показывает, что в результате регулирования содержание органического углерода во взвесах в среднем за год воз-

растает более чем в 1,5 раза, содержание общего фосфора более, чем в 2 раза. Годовая концентрация азота во взвесах возрастает в 1,3 раза (табл. 2). Максимальной трансформации подвергается состав взвешенных веществ в период весеннего половодья, а поскольку весной проходит около 80% всего стока взвесей, то среднегодовые показатели содержания биогенов во взвесах, сбрасываемых из водоема, близки к весенним. Основным механизмом трансформации состава взвесей в водохранилище является седиментация части речных взвесей, происходящая в период весеннего наполнения. Другие процессы, которые могут вести к изменениям в составе взвесей, не получают значительного развития в тех гидрометеорологических условиях, которые существуют на водоеме в этот период. Действие их в остальные сезоны года хоть и приводит к некоторым изменениям в составе взвесей, но не к столь существенным, как весной.

Основная трансформация состава стока взвешенных веществ происходит в Ивановском плесе водохранилища, характеризующемся наиболее высокими темпами седиментации [2], наличием условий для образования трансседиментационных автохтонных взвесей и большими, в сравнении с Волжским плесом, величинами первичной продукции [14]. Поступление автохтонного взвешенного вещества из высокопродуктивного и сильно зарастающего Шошинского плеса не может быть значительным, т. к. водообмен этого плеса с остальной частью водохранилища в межень слаб, а автохтонная взвешенная органика в условиях хорошо прогреваемого мелководного плеса подвергается быстрой минерализации.

Несмотря на увеличение концентраций органического вещества и биогенов во взвесах, сбрасываемых из водохранилища, в маловодный 1972 г. наблюдалось уменьшение общего стока взвешенного углерода, азота и фосфора в створе гидроузла, обусловленное количественной трансформацией стока речных взвесей. Сток взвешенного углерода в створе гидроузла (с учетом водозабора в канал им. Москвы) составлял 53% от поступления его с речными водами, сток взвешенного азота — 41%, взвешенного фосфора — 61%. В годы с более интенсивным весенним водообменом разность в стоке взвешенной формы биогенов на входном и замыкающем створах водохранилища должна быть существенно меньше.

### **Влияние Угличского водохранилища на состав стока взвешенных веществ**

В общем стоке взвешенных веществ, поступающих в Угличское водохранилище с водосбора, на долю сбросов из Ивановского водохранилища приходится в среднем 70%, с колебаниями от 63 до 78% [2]. Водосбор боковых притоков по своим физико-географическим условиям не отличается существенно от водосбора Волги. Исходя из этого, приведенные выше показатели состава стока взвесей в створе Ивановской ГЭС могут быть использованы для характеристики состава взвешенного вещества, поступающего в водохранилище с водосбора.

Сезонная динамика взвешенного вещества в замыкающем створе водохранилища определяется особенностями регулирования стока вышележащими водохранилищами и процессами образования автохтонных взвесей [10]. Она характеризуется весенним максимумом взвесей (30—40 мг/л), несколько уменьшенным по сравнению с рекой в результате седиментации части речных взвесей. В летне-осенний период скорости стоковых течений в водохранилище невелики. Это обуславливает седиментацию речных взвесей. Вместе с тем, в это время воды водохранилища обогащаются автохтонными взвесями. Та часть автохтонного материала, которая в силу своих гидравлических свойств остается во взвешенном состоянии, компенсирует частично или полностью уменьшение мутности, вызываемое седиментацией аллювиальных взвесей. В результате величина мутности в замыкающем створе водохранилища в этот период (2—15 мг/л) зависит не столько от мутности вод, поступающих в водохранилище, сколько от интенсивности образования автохтонных взвесей. Время увеличения мутности в створе ГЭС в меженный период определяется в значительной степени случайным сочетанием гидродинамических и биотических факторов. Зимой содержание взвесей в воде, сбрасываемой из Угличского водохранилища, равно 2—3 мг/л. Такой характер сезонных изменений количества взвесей в створе Угличской ГЭС наблюдался нами в различные по водности годы — 1967, 1968, 1973.

Среднее месячное содержание углерода взвесей в воде, поступающей из Угличского водохранилища в Рыбинское, в 1973 г. изменялось от 0,4 до 2 мг/л соответственно колебаниям мутности. Месячные концентрации органического углерода во взвешенном веществе составляли от 10 до 30%. Максимальные значения месячных концентраций углерода во взвесах наблюдались в период зимней межени. При прохождении пика половодья концентрация углерода во взвесах падала до 7%, а средняя апрельская ее величина составляла 10%, что несколько выше, чем на незарегулированном участке Волги, но практически не отличается от наблюдаемой в створе Ивановской ГЭС. В течение мая-октября месячное содержание углерода во взвесах колебалось в 1973 г. в пределах 10—15% и только в ноябре возросло до 25%. Сопоставление с данными, полученными в другие годы, показывает, что концентрация углерода во взвесах в весенние месяцы мало изменяется по годам и составляет 10—12% (табл. 3). Поскольку весной проходит основная часть стока взвесей, то среднегодовое содержание углерода во взвесах близко к весеннему — 10—14%. В стоке взвешенных веществ из Ивановского водохранилища концентрация углерода равна весной 13—14%, за год 14—16%. Значительных изменений в концентрации органического углерода во взвесах при регулировании стока Волги Угличским водохранилищем не происходит, но намечается некоторая тенденция к снижению средней годовой концентрации углерода (табл. 3). Угличское водохранилище более проточно, чем Ивановское. Поэтому седиментация взвесей половодья, поступающих с волжским стоком, в нем менее значительна, чем в Иванов-

ском. На спаде половодья, в мае, мутность воды в створе Угличской ГЭС превышает мутность вод, поступающих из Ивановского водохранилища, т. к. в это время воды, поступающие с боковым протоком имеют большую мутность, чем сбрасываемые из Ивановского водохранилища, а скорости течения в Угличском водохрани-

Таблица 3

**Концентрации органического углерода во взвесах  
в створах Ивановской и Угличской ГЭС, % %**

Год	Зима (I—III, XII)	Весна (IV—V)	Лето (VI—VIII)	Осень (IX—XI)	Год
<b>Ивановская ГЭС</b>					
1968	24	13	21	21	14
1972	26	14	23	17	16
<b>Угличская ГЭС</b>					
1967	32	12	24	14	14
1968	22	10	12	19	10
1973	24	11	11	18	13

лище сохраняются достаточными для переноса взвесей, а на верхнем участке и для размыва донных отложений. Поэтому возможно обогащение взвесей минеральными частицами за счет взмучивания и некоторое уменьшение доли органического вещества во взвесах.

Содержание взвешенной формы азота в воде, поступающей из Угличского водохранилища в Рыбинское, колеблется по сезонам от 0,05 мг/л осенью и зимой до 0,2 мг/л весной, общего фосфора от 12 мкг/л осенью до 53 мкг/л — весной. Колебания концентраций N и P во взвесах очень невелики и не имеют четко выраженного сезонного хода. Концентрация азота во взвесах составляет 1,6—2,0% (средняя годовая величина — 1,7<sup>c</sup>/<sub>o</sub>), концентрация P—0,3—0,7%, в среднем за год 0,4% (табл. 4). Эти величины весьма близки к на-

Таблица 4

**Характеристики состава взвесей в створе Угличской ГЭС в 1973 г.**

Характеристика	Зима (I—III, XII)	Весна (IV—V)	Лето (VI—VII)	Осень (IX—XI)	Год
Мутность, мг/л	2,5	13,6	8,0	2,8	7,7
Углерод ор-ганический	0,6	1,5	0,9	0,5	1,0
% веса взвесей	24	11	11	18	13
Азот орга-нический	0,05	0,22	0,14	0,05	0,13
% веса взвесей	2,0	1,6	1,8	1,8	1,7
Фосфор об-щий	17	53	25	12	30
% веса взвесей	0,7	0,4	0,3	0,4	0,4

блюдаемым в створе Ивановской ГЭС, т. е. существенных изменений в концентрации этих элементов в результате регулирования стока Угличским водохранилищем не отмечается. Общий их сток должен уменьшаться пропорционально уменьшению стока взвесей, которое составляет в среднем за многолетие 11% [6].

Поскольку концентрация органического вещества и основных биогенных элементов во взвесах в створе Угличской ГЭС существенно не отличается от наблюдающейся в створе Ивановской ГЭС, вывод о влиянии регулирования на состав стока взвесей Волги, полученный для Ивановского водохранилища, остается справедливым и для створа Угличской ГЭС. Возрастание концентрации органического вещества и биогенов во взвесах происходит при одновременном уменьшении содержания их взвешенной формы в воде. Годовое содержание взвешенной формы С, N и P в воде в створе Угличской ГЭС примерно вдвое меньше наблюдаемого в Верхней Волге выше Ивановского водохранилища (табл. 2, 4). Сезонный ход концентраций органического вещества и биогенов во взвесах более сглажен за счет их менее выраженного, чем в реке, весеннего падения.

По данным о перманганатной окисляемости фильтрованной воды ориентировочно рассчитан годовой сток растворенного органического вещества в створе Угличской ГЭС и определена доля взвешенного органического вещества в стоке суммарного (взвешенного и растворенного) органического вещества. Взвешенное органическое вещество в створе Угличской ГЭС составляет 9% от суммарного. В Верхней Волге взвешенное органическое вещество составляет 22—24%, в створе Ивановской ГЭС — 15% от суммарного. Таким образом, в результате регулирования происходит постепенное снижение доли взвешенного органического вещества в общем его стоке, что обусловлено снижением содержания взвешенной формы углерода в воде при относительном постоянстве содержания растворенного углерода, которое равно 9—11 мг/л на всем протяжении Волги от Ржева до Угличской плотины.

### **Влияние Рыбинского водохранилища на состав стока взвешенных веществ**

Для характеристики состава взвешенных веществ, поступающих в Рыбинское водохранилище с водосбора, исследовались взвеси основных притоков — Волги, Мологи, Шексны. Показатели состава стока взвешенных веществ Волги, трансформированного Ивановским и Угличским водохранилищем, приведены в предыдущем разделе.

Сток взвешенных веществ Мологи изучался у г. Устюжны [9]. Эрозионные процессы на водосборе Мологи развиты слабо. Заболоченность бассейна около 7%, преобладают легкие супесчаные и суглинистые разновидности подзолистых и дерновоподзолистых почв. На севере бассейна распространены болотные почвы. Средняя годовая мутность Мологи у Устюжны в маловодном 1973 г. равнялась 12 мг/л, а средняя многолетняя мутность в этом пункте —

7 мг/л, что почти в 3 раза меньше средней многолетней ее величины в Волге у Калинина. Этим определяется и более низкое содержание взвешенной формы органического вещества и биогенов в воде (табл. 5). Сезонная динамика взвешенной формы органического вещества и биогенов в р. Мологе подчиняется тем же закономерностям, которые были получены для Верхней Волги. Содержание

Таблица 5

**Характеристики состава взвесей р. Мологи у г. Устюжны в 1973 г.**

Характеристика		Зима (I—III, XII)	Весна (IV—V)	Лето (VI—VIII)	Осень (IX—XI)	Год
Углерод	мг/л	0,7	1,6	0,9	0,6	1,2
органический % от веса взвесей		16	10	20	26	10
Азот	мг/л	0,05	0,19	0,10	0,04	0,15
органический % от веса взвесей		1,3	1,2	2,4	1,6	1,3
Фосфор	мкг/л	21	44	18	10	34
общий % от веса взвесей		0,5	0,3	0,4	0,5	0,3
C:N		12	8	8	16	8
C взвешенный органический %		14	9	17	21	9
C суммарный органический						

взвешенного углерода, азота и фосфора в воде изменялось в соответствии с годовым ходом мутности. Концентрация органического углерода во взвесах колебалась от 7% в половодье до 33% — поздней осенью. Минимальные концентрации азота и фосфора во взвесах, составляющие, соответственно, 1,0 и 0,2%, также наблюдались в половодье. Максимальная концентрация азота во взвесах (3,7%) отмечена летом, фосфора (0,58%) — зимой.

Сопоставление полученных результатов с имеющимися данными о содержании общего азота и фосфора в р. Мологе [13, 16] показывает, что в весенний период азот взвесей составляет около 20% общего и 40% органического азота. На долю фосфора взвесей в летне-осенний период приходится 35—50% от общего фосфора.

Характерными особенностями Мологи в сравнении с Верхней Волгой является вдвое меньшее содержание взвешенной формы углерода, азота и фосфора в воде, повышенная концентрация N и P во взвесах при примерно одинаковой концентрации C, т. е. более узкое отношение C:N. Годы наблюдений на Мологе и Волге близки по водности и мало вероятно, что различия в величинах отношения C:N определяются особенностями отдельных лет. По-видимому причина заключается в особенностях состава почв водосбора.

Доля взвешенного органического углерода в суммарном стоке органического углерода составляет в Мологе 9%. Это значительно



меньше, чем в Верхней Волге (22%) и определяется меньшей интенсивностью эрозионных процессов при небольших различиях в содержании растворенного органического вещества (средняя годовая величина перманганатной окисляемости фильтрованной воды равнялась в 1973 г. 11,4 мг О/л). При впадении Мологи в Рыбинское водохранилище доля взвешенного органического углерода в суммарном его стоке еще более снижается, так как после впадения Чагодоши, несущей цветную воду, возрастает содержание растворенного углерода. Вместе с тем, впадение Чагодоши не оказывает влияния на мутность Мологи. По единичным определениям в летнюю межень, когда соотношение расходов Мологи и Чагодоши составляет примерно 2:1, заметных изменений в концентрации взвешенного органического углерода ниже впадения Чагодоши не происходит. Можно полагать, что это справедливо и для других рассматриваемых элементов.

Создание Шекснинского водохранилища привело к ослаблению транспортирующей способности потока, уменьшению средней годовой мутности в створе гидроузла с 40 до 4 г/м<sup>3</sup>, а среднего годового стока взвешенных веществ, поступающих в Рыбинское водохранилище, с 227 тыс. т до 14 тыс. т [2]. Режим взвешенных веществ в створе Шекснинского гидроузла в 1974 г. типичен для условий, созданных в результате зарегулирования реки. Годовой ход мутности не имел отчетливо выраженного весеннего пика. В течение мая-сентября мутность не превышала 5 г/м<sup>3</sup>, в остальное время — 2—3 г/м<sup>3</sup>. Средняя годовая мутность 3,5 г/м<sup>3</sup>, средний годовое количество взвешенных веществ — 12,5 тыс. т.

Содержание углерода взвесей в воде в створе гидроузла колебалось незначительно — 0,3—0,7 мг/л. Максимальное содержание взвешенного углерода наблюдалось в начале июня. К началу весны речная часть водохранилища заполнена зимними водами белозерского происхождения, которые постепенно смешиваются с водами половодья речных притоков [3]. К середине мая — началу июня доля речных вод в сбросах из водохранилища возрастает, несколько увеличивается мутность воды и, соответственно, содержание взвешенного органического углерода. Однако в отличие от речных вод, относительная концентрация углерода во взвесах остается сравнительно высокой (13—20%), поскольку в условиях слабой проточности приплотинного участка часть минеральных взвесей осаждается, не достигая створа плотины. В течение остальной части года в сезонной динамике органического углерода взвесей не проявляется каких-либо четких закономерностей. Относительное содержание углерода во взвесах сохраняется довольно высоким (9—25%). Динамика азота и фосфора взвесей аналогична описанной для углерода. Содержание азота взвесей в воде колеблется от 0,04—0,13 мг/л, фосфора — 5—20 мкг/л, концентрация азота во взвесах 1—4,3%, фосфора — 0,11—0,53%.

Приведенные цифры, а также среднемесячные характеристики состава взвесей (табл. 6) свидетельствуют, что уровень содержания органического вещества во взвесах выше, чем в незарегулированных

водах Мологи и Волги и близок к наблюдаемому в зарегулированных водах Волги. Величины отношения С: N в течение лета и осени имеют значения 5—6, свидетельствуя о преобладании автохтонного органического вещества во взвесах, сбрасываемых через плотину. Сопоставление с данными по содержанию общего и органического азота в воде весной [16] показывает, что в шекснинских водах азот взвесей составляет всего 6% от общего и 8% от органического азота. Для шекснинских вод характерно также снижение доли взвешенного углерода в суммарном стоке, в сравнении с другими крупными притоками водохранилища, что несомненно является результатом регулирования стока Шекснинским водохранилищем, аккумулирующим сток речных взвесей.

Таблица 6

Характеристики состава взвесей в створе Шекснинской ГЭС в 1974 г.

Характеристика		Зима (I—III, XII)	Весна (IV—V)	Лето (VI—VIII)	Осень (IX—XI)	Год
Мутность	мг/л	2,6	4,9	4,5	2,0	3,5
Углерод органический	мг/л	0,4	0,7	0,6	0,3	0,5
	% от веса взвесей	14	16	13	16	14
Азот органический	мг/л	0,05	0,06	0,10	0,06	0,06
	% от веса взвесей	1,7	1,3	2,1	3,1	1,7
Фосфор, общий	мкг/л	5	18	17	7	11
	% от веса взвесей	0,2	0,4	0,4	0,3	0,3
С: N		8	12	6	5	8
С взвешенный органический	%	3	6	5	3	4
С суммарный органический						

Динамика мутности и внутригодовое распределение стока взвешенных веществ в створе Рыбинской ГЭС значительно отличается от наблюдающихся в реках. Во время ледостава, до начала наполнения водохранилища, величина мутности в створе ГЭС минимальна (1—3 мг/л). В период интенсивного наполнения водохранилища происходит быстрое возрастание мутности от зимних значений до величин, характерных для навигационного периода. В навигационный период отмечаются наибольшие величины и колебания мутности от 5 до 30 мг/л. В это время под влиянием местных факторов в озеровидном Главном плесе водоема происходит обогащение воды автохтонными взвесями. Интенсивность процессов образования автохтонных взвесей в Рыбинском водохранилище значительно превосходит интенсивность поступления речных взвесей и определяет содержание и состав взвешенного вещества, сбрасываемого из водоема. Содержание органического углерода взвесей в воде, сбрасы-

ваемой из водохранилища, колебалось в год наших наблюдений в пределах 0,5—1,8 мг/л, составляя в среднем за год 1 мг/л (табл. 7). Концентрация органического углерода во взвесах зимой (23%) не отличалась от наблюдающейся на всей Верхней Волге. При прохождении половодья концентрация углерода во взвесах остается на том же уровне, в отличие от Ивановской и Угличской ГЭС, где весной отмечается ее резкое снижение. Причина заключается в аккумуляции водохранилищем стока взвешенных веществ Мологи и Шексны и значительной части стока взвесей, поступивших из Угличского водохранилища. Только на протяжении Волжского плеса Рыбинского водохранилища мутность в период прохождения максимальных расходов уменьшается в 3—5 раз. Взвеси, не успевшие осесть при продвижении по плесу, поступают с волжскими водами в расширенную часть водохранилища, откуда с частью волжской водной массы попадают в сбросной плес. При малых скоростях течения, наблюдающихся в расширенной части водоема, происходит осаждение минеральных взвесей, и большая часть взвесей, достигающих створа гидроузла, представлена органическими частицами.

В течение лета и осени содержание органического углерода во взвесах снижается в сравнении с зимой и весной в связи с тем, что основная масса (около 70%) взвесей в этот период имеет абиогенный характер. Это подтверждается как результатами микроскопического исследования взвесей, так и статистическим анализом зависимости мутности от совокупности гидродинамических факторов [4, 11]. Вместе с тем органическое вещество взвесей сброса имеет автохтонное происхождение, о чем свидетельствуют низкие величины отношения C : N. Сезонный ход концентраций азота и фосфора во взвесах в створе ГЭС аналогичен рассмотренному для углерода и опре-

Таблица 7

Характеристики состава взвесей в створе Рыбинской ГЭС в 1974 г.

Характеристика	Зима (I—III, XII)	Весна (IV—V)	Лето (VI—VIII)	Осень (IX—XI)	Год
Мутность, мг/л	3,3	6,0	6,2	7,7	6,0
Углерод мг/л	0,7	1,3	0,7	1,2	1,0
органический % от веса взвесей	23	23	12	15	17
Азот мг/л	0,07	0,19	0,11	0,14	0,12
органический % от веса взвесей	2,2	3,2	1,8	1,8	2,0
Фосфор мкг/л	7	15	6	14	10
общий % от веса взвесей	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2
C : N	10	7	7	8	8
C взвешенный органический %	7	11	7	10	8
C суммарный органический					

деляется теми же факторами. Средние сезонные концентрации азота во взвесах колеблются от 1,8 до 3,2% (за год 2%), фосфора — от 0,16 до 0,26% (за год 0,17%).

Средние концентрации С, N и Р в суммарном поступлении речных взвесей в водохранилище, рассчитанные с учетом доли каждой реки в общем стоке взвесей, равны наблюдающимся в волжских взвесах. Сопоставление характеристик волжских взвесей с данными табл. 7 показывает, что в створе Рыбинской ГЭС годовая концентрация органического углерода во взвесах возрастает на 30%, азота — на 20%, а общего фосфора — снижается вдвое.

Максимальной трансформации подвергается весенний сток взвешенных веществ. Содержание С, N во взвесах сброса весной в 2 раза превышает таковое в речных взвесах, а содержание Р несколько снижается. Предположительной причиной противоположной направленности в изменениях концентраций Р по сравнению с С и N, может быть осаждение в водоеме с очень слабым весенним водообменом не только крупных, но и значительной части мелких фракций речных взвесей и содержащихся в них минеральных соединений фосфора, составляющих в половодье более половины фосфора взвесей [1].

Летом и осенью в водохранилище преобладают взвеси взмучивания. Происходит разбавление планктонного детрита частицами донных отложений. Результирующие концентрации органического углерода азота и общего фосфора занимают промежуточное положение между величинами их в планктонном детрите и донных отложениях. Поскольку большая часть стока взвесей происходит через гидроузел осенью (около 50%), то годовые характеристики состава стока взвесей близки к осенним.

Таким образом, при регулировании стока Рыбинским водохранилищем увеличение годовой концентрации органического углерода во взвесах несколько меньше, чем в Ивановском водохранилище, а концентрация фосфора падает, т. е. изменение ее противоположно, наблюдающемуся в Ивановском водохранилище.

### Заключение

В результате проведенного исследования получены сезонные и среднегодовые показатели содержания органического вещества и основных биогенных элементов в стоке взвешенных веществ незарегулированного участка Верхней Волги и створах четырех верхневолжских ГЭС — Ивановской, Угличской, Шекснинской, Рыбинской. Установлено, что вследствие регулирования Верхней Волги происходит трансформация состава стока взвешенных веществ. Основными механизмами трансформации является седиментация части речных взвесей во время весеннего наполнения и образование автохтонных (трансседиментационных и биотических) взвесей в летне-осенний период. Направленность и степень изменений в составе взвесей под влиянием этих процессов может быть различна, в зависимости от характера регулирования и гидролого-морфометрических особенностей водоема. На протяжении каскада водохранилищ средняя годовая

концентрация органического углерода и азота во взвесах возрастает в 2 раза в сравнении с незарегулированным участком реки. Концентрация общего фосфора во взвесах возрастает под влиянием Иваньковского водохранилища более чем в 2 раза, а затем в Рыбинском водохранилище вновь снижается до значений, наблюдаемых в речных взвесах. Изменения в составе взвесей сопровождаются снижением содержания взвешенной формы углерода и азота в воде в 2 раза, фосфора — в 5 раз. Доля взвешенного органического вещества в суммарном его стоке снижается с 22—24% на незарегулированном участке Волги до 8% в замыкающем створе каскада.

Таким образом, регулирование речного стока приводит к количественным изменениям ряда его характеристик и может заметно менять не только массу, но и состав взвешенных веществ, переносимых стоком, т. е. воздействовать на качественную специфичность этого процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бруевич С. В. и Костромина А. А. Определение органического и минерального фосфора в природных водах. Журн. прикл. химии. 1938, т. 11, № 4, с. 682—690.
2. Буторин Н. В., Зиминова Н. А., Курдин В. П. Донные отложения верхневолжских водохранилищ. Л., «Наука», 1975.
3. Ершова М. Г. Водные массы Череповецкого водохранилища. В кн.: «Биологические и гидрологические факторы местных перемещений рыб в водохранилищах». Л., 1968, с. 3—21.
4. Зиминова Н. А. Количественная характеристика взвесей Рыбинского водохранилища. В кн.: «Биологические аспекты изучения водохранилищ». М — Л., 1963, с. 230—249.
5. Зиминова Н. А. Состав взвесей Рыбинского водохранилища. В кн.: «Динамика водных масс водохранилищ». М. — Л., 1965, с. 100—111.
6. Зиминова Н. А. Влияние верхневолжских водохранилищ на режим стока взвешенных наносов Волги. Изв. АН СССР, сер. геогр., 1973, № 1, с. 61—67.
7. Зиминова Н. А. Влияние Иваньковского водохранилища на состав стока взвешенных веществ Волги. Водные ресурсы, 1977, № 3, с. 62—69.
8. Зиминова Н. А., Григорьева Е. Р. Поступление аллохтонного органического вещества в Иваньковское водохранилище. Информ. бюлл.: «Биол. внутр. вод», № 24, с. 54—58.
9. Зиминова Н. А., Законнов В. В. Содержание углерода, азота и фосфора во взвесах р. Мологи. Информ. бюлл. «Биол. внутр. вод», 1977, № 34, с.
10. Зиминова Н. А., Курдин В. П. О режиме взвесей в Угличском водохранилище. Информ. бюлл. «Биол. внутр. вод», 1971, № 10, с. 71—75.
11. Зиминова Н. А., Курдин В. П. О применении статистического метода к расчету мутности в створе Рыбинской ГЭС. Информ. бюлл. «Биол. внутр. вод», 1972, № 5, с. 71—74.
12. Зиминова Н. А., Трифонова Н. А., Григорьева Е. Р. Органическое вещество и биогенные элементы во взвесах Верхней Волги. В кн.: «Биологические продукционные процессы в волжских водохранилищах». Л., 1976, с. 39—48.
13. Монакова С. В. Минеральный и органический фосфор в воде Рыбинского водохранилища в 1965 г. В кн.: «Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения». Л., 1968, с. 217—222.
14. Пырина И. Л. Первичная продукция фитопланктона в Иваньковском, Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах в зависимости от некоторых факторов. В кн.: «Продуктирование и круговорот органического вещества во внутренних водоемах». М. — Л., 1966, с. 249—270.
15. Скопинцев Б. А. и А. Г. Бакулина. Органическое вещество в водах Рыбинского водохранилища в 1964 г. В кн.: «Продуктирование и круговорот органического вещества во внутренних водоемах». М — Л., 1966, с. 3—32.
16. Трифонова Н. А. Соединения азота в Рыбинском водохранилище. Автореф. канд. дисс. М., МГУ, 1974.

## Исследования оборачиваемости фосфатов в водной толще водохранилищ

Согласно современным представлениям, комплекс биохимических процессов, ответственный за цикличность и интенсивность биологических явлений в водоеме, представляет единую динамически устойчивую в известных пределах систему. В результате ее функционирования дополнительные количества фосфора, поступившие в водоем, могут быть выведены из воды в донные отложения, или вследствие включения биогенов в процессы биотического круговорота произойдет нарушение равновесной системы и смещение ее на более высокий функциональный уровень. Следовательно, оценка степени евтрофирования водоема является сложной и индивидуальной для водоемов данного региона задачей, ее решение требует не только изучения природных и антропогенных источников поступления биогенных элементов, но и исследования режима биогенов в связи с особенностями функционирования экосистемы в целом [28].

В водохранилищах севера Европейской части Союза биогенные элементы присутствуют обычно в малых количествах и активно включаются в круговорот вещества. Поэтому при изучении обеспеченности водоема фосфором необходимы определения не только концентраций минеральных форм, являющихся основным компонентом питания фитопланктона, но и содержания общего фосфора. Основным источником поступления последнего служит речной сток [4]. Высокая интенсивность деструкционных процессов в водной массе водохранилища [7], часто превосходящая продукцию фитопланктона, позволяет высказать предположение о непрерывном пополнении запаса минеральных соединений фосфора и повторном их включении в «малый круговорот» веществ в водной толще, минуя донные отложения. Изучение этого процесса возможно по скорости поглощения меченого фосфора.

Первые исследования кинетики фосфорного обмена с применением радиофосфора производились на малых озерах с отчетливо выраженной температурной стратификацией. Радиофосфор в большом количестве добавлялся непосредственно на поверхность водоема. Хатчинсон и Бовин [18], изучая скорость проникновения  $^{32}\text{P}$  в различные слои небольшого евтрофного озера, установили заметное увеличение активности в гипolimнии в первую неделю опыта, в последующие три недели активность оставалась практически постоянной. Это послужило основанием к предположению наличия в водоеме устойчивого равновесия между фосфатными ионами и менее усвояемой формой фосфора, выделенной фитопланктоном, а также фосфором сестона. К аналогичному выводу пришли канадские исследователи [15], считая, что фосфатный уровень в озере обусловлен поглощением фосфатов растениями и выделением их при разложении отмерших организмов и поступлением с притоком. Математическое выражение кинетики поглощения радиофосфора в озере приводится в работе Хейса и др. [16]. Сначала поглощение

идет быстро, затем проявляется тенденция к снижению скорости и достигается плато. В течение первых дней процесс идет экспоненциально, при использовании полулогарифмической шкалы график имеет вид прямой. На основе полученных данных авторы приходят к выводу о том, что в водоеме имеет место непрерывный обмен между водой и твердым веществом. К последнему наряду с растениями и животными относится верхний слой донных отложений. Во время первой, экспоненциальной стадии поглощения  $^{32}\text{P}$  выделение его из твердой фазы практически не ощущено. В дальнейшем возврат радиофосфора становится заметным и проявляется тенденция к поддержанию постоянного уровня. Снижение активности по экспоненте позволяет определить время, за которое поглотится половина радиоактивных атомов ( $t_{0.5}$ ), и рассчитать соответственно время оборота  $t_1$ , то есть время, которое требуется для появления или исчезновения фосфатов, содержащихся в воде. Время оборота фосфатов в экспериментальном озере составило 5,4 дня.

По определениям Риглера [24], на заболоченном озере небольшого размера время оборота растворенного минерального фосфора было равно 3,5 дням. Основным фактором поглощения добавленного в озеро радиофосфора был обмен фосфатов с организмами литорали, а не поступление в гипolimнион и донные отложения, как в предыдущих исследованиях. Этим же автором установлена возможность проведения определений в изолированных пробах воды. Полученные результаты характеризуют скорость оборота фосфатов в слое озера, из которого отбиралась проба. Последнее обстоятельство чрезвычайно важно, так как делает возможным применение метода радиоактивных индикаторов при изучении оборачиваемости фосфатов в водной толще крупных водоемов. Показано, что время оборота в воде трофогенного слоя составляло около 5 мин, если твердое вещество (в основном планктон) отделялось путем фильтрации через миллипоровый бактериальный фильтр, а не с помощью центрифугирования или фильтрации через бумажный фильтр. Таким образом установлено, что бактерии являются не менее ответственным фактором поглощения фосфатов, чем фитопланктон.

На группе канадских озер изучались различные формы фосфора и время оборота фосфатов [25]. Преобладающей фракцией оказался фосфор, входящий в состав взвесей (60—68%), содержание растворенных органических соединений было относительно постоянно и составило в 8 озерах 25—32%, на долю фосфатов приходилось 5—7%. В воде всех исследованных озер, за исключением одного, время оборота не превышало 10 мин. Поскольку озера различались по глубине, размеру, цветности воды, солевому составу, содержанию общего фосфора, высказывается предположение, что быстрый обмен минерального фосфора в трофогенном слое — явление, характерное для озер независимо от их типа.

Широкие пределы колебаний времени оборота фосфатов обнаружены Помером в морской воде [23]. В его работе подчеркивается, что время оборота зависит как от метаболической активности гидробионтов, так и содержания минерального фосфора. Следова-

тельно, система, имеющая короткое время оборачиваемости фосфатов, или обеднена ими, или биологически активна. Если имеют место оба условия, время оборота становится крайне малым. При характеристике интенсивности биохимических процессов больший интерес представляет величина скорости оборота. Высказывается предположение, что при оценке стабильности высокопродуктивных систем скорость оборота более важна, чем концентрация фосфатов.

Уэт и Хейс [30], изучая цикл превращения фосфора в морской воде, рассматривают его как трехкомпонентную двухфазную систему:



Путем экспериментальных исследований ими установлено, что растворенный органический фосфор образуется в результате бактериального распада отмершего плантона и что нет прямого обмена между фосфором растворенным минеральным и растворенным органическим — обмен идет через фракцию взвесей.

Для изучения превращения фосфора в водоеме, как показывают результаты приведенных выше работ, необходимо точное определение содержания различных фракций фосфора. Не менее важно для оценки скорости оборота фосфатов знание содержания инстинно растворенного минерального фосфора. В связи с этим следует остановиться на дискуссионном в данное время вопросе о возможности применения обычно используемого для определения ортофосфатов в воде стандартного метода Дениже. Риглер [26, 27] на основе радиобиологических исследований и применения окиси циркония — специфического адсорбента фосфатного иона — утверждает, что молибденово-голубой метод может завышать содержание ортофосфатов в озерной воде в 10—100 раз. Это обусловлено присутствием или мешающих ионов, или растворенных легкогидролизуемых органических соединений. Однако Чемберлен и Шапиро [14], сравнивая различные методы и в том числе новый метод определения фосфатов по биологическому тесту, не подтвердили это положение. Из 11 исследуемых озер только в одном, в воде которого было высокое содержание мышьяка, стандартный метод дал завышенные результаты. Авторы рекомендуют применять модифицированный метод, нечувствительный к мышьяку. В связи со сказанным выше в методическом руководстве Стрикленда и Парсонса [29] при описании молибденово-голубого метода вводится новый термин «реактивный фосфор» вместо растворенного минерального. Таким образом, следует иметь в виду, что установленное молибденово-голубым методом содержание ортофосфатов может быть не идентично содержанию биологически пригодного растворенного минерального фосфора и являться предметом ошибок при определении скорости оборота фосфатов.

Систематические исследования форм и скорости обмена фосфора выполнены Лином на небольшом евтрофном озере [19, 20, 21]. Летом основную фракцию составляет фосфор взвесей (98%), на долю минерального растворенного приходится всего десятые доли про-



цента от общего (0,21), органические соединения фосфора представлены двумя фракциями. Методом гельфильтрации и ультрацентрифугирования установлено, что большую часть составляет коллоидальная фракция или фракция агрегатной природы с высоким молекулярным весом (5000000). Растворенная низкомолекулярная (250) фракция содержится в ничтожно малых количествах (0,13% от общего) и, как показали эксперименты, образуется за счет прижизненных выделений планктона, а не бактериального распада отмерших организмов, как утверждали Уэт и Хейс [30]. Выделенный планктоном органический фосфор реагирует с коллоидальным органическим веществом, присутствующим в озерной воде, образуя высокомолекулярный комплекс. Образование этого комплекса сопровождается выделением фосфатов.

Обмен фосфатов между раствором и сестоном (планктоном), также как и по данным предыдущих исследований, происходил очень быстро. Обмен между растворенными метаболитными соединениями и сестоном если и происходил, то так медленно, что не мог влиять на кинетику поглощения  $^{32}\text{PO}_4$ . Однако показано, что наличие двух фаз поглощения фосфатов имело место довольно часто, особенно в воде эпилимниона. По-видимому, вторая фаза включает обмен фосфатами между сестоном и раствором через коллоидальный органический комплекс. Образование последнего происходит только в присутствии сестона, что свидетельствует о биотической природе этого комплекса.

Краткий обзор литературных данных показал, что применение радиоизотопа  $^{32}\text{P}$  позволяет проводить исследования круговорота фосфора как в водоеме в целом, так и в водной толще, используя в последнем случае изолированные пробы воды. Основной фазой фосфорного цикла является непосредственный обмен растворенного минерального фосфора (фосфатный ион) между водой и сестоном. Летом в эпилимнионе озер возможна двухфазная кинетика: вторая фаза включает обмен фосфатов между сестоном и водой через органические соединения. Константа скорости поглощения и выделения фосфатов в первую фазу примерно в 100 раз превышает константу скорости обмена второй фазы. Исследования фосфорного цикла в пресных водах выполнены на малых евтрофных озерах с очень низким содержанием растворенного минерального фосфора. Количественная характеристика этого процесса в водохранилищах не производилась.

В настоящей работе рассмотрены результаты исследования оборачиваемости фосфатов в водной массе водохранилищ различной трофии и сделана попытка оценить роль этого процесса в фосфорном бюджете одного из водохранилищ.

Наблюдения проводились на Рыбинском водохранилище — водоеме мезотрофного типа и на отличающемся более высокой степенью трофии Иваньковском. На протяжении ряда лет в этих водоемах определялось содержание фосфатов и общего фосфора<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Анализ выполнен Л. А. Петуховой и Л. Ф. Генкал.

Определение растворенного минерального фосфора (фосфаты) проводилось по общепринятому методу Дениже-Аткинса [5]. Оптическая плотность окрашенного фосфорно-молибденового комплекса определялась на ФЭК-56 с красным светофильтром в кюветах с расстоянием между рабочими гранями 5 см. Чувствительность метода — 1 мкгР/л, точность —  $\pm 3-5\%$ . При низких концентрациях (до 3 мкг/л) точность составляет 45—50%. При определении общего фосфора для разрушения фосфорсодержащих соединений было испытано 4 способа: автоклавирование при 2 атм [12], облучение ультрафиолетом [9], окисление хлорной кислотой [30], окисление надсернохлористым калием [22,1]. Испытанные способы дали близкие результаты. Наиболее удобным и быстрым оказался метод окисления персульфатом калия, который и принят в дальнейшем для определения общего фосфора.

Как указывалось выше, определение времени и скорости оборота фосфатов в водной толще водоема основано на измерении поглощения радиоактивного фосфора в изолированных пробах воды. Кинетика поглощения выражается экспоненциальным снижением содержания радиоактивных атомов в фильтрате до состояния равновесия. В равновесной системе время поглощения имеющихся фосфатов равно времени их выделения и, следовательно, соответствует времени оборота минерального фосфора в исследуемой воде.

Для определения времени оборота радиоактивный фосфор в виде фосфорной кислоты без носителя добавлялся к 2 л воды, только что отобранной из водоема, из расчета 1 мккюри/л. Через определенные промежутки времени 10 мл исследуемой воды фильтровались через мембранный фильтр с диаметром пор 0,5—0,7 мкм. Радиоактивность сухих остатков на фильтрах и исходная активность сухого остатка нефилтрованной воды измерялась под торцовым счетчиком.

Время оборота ( $t_1$ ) рассчитывалось по формуле:

$$t_1 = \frac{t_{0,5}}{\ln 2}$$

Время, за которое поглотится половина имеющихся атомов  $^{32}\text{P}$ , ( $t_{0,5}$ ) находилось из графика (рис. 1), на котором логарифм активности фильтрата наносился как функция времени. Скорость оборота рассчитывалась как частное от деления концентрации фосфатов в исследуемой воде на время оборота.

Поскольку в задачу настоящей работы входит оценка интенсивности биотического оборота фосфатов, представляло интерес выяснение роли абиотической сорбции в процессе поглощения  $^{32}\text{P}$ . С этой целью выполнены опыты с природной водой, предварительно нагретой до  $100^\circ\text{C}$  и охлажденной, а также с водой, фиксированной сулемой. Использовалась вода, отобранная из Иваньковского и Рыбинского водохранилищ. В первом варианте содержание взвешенных веществ составляло 9 мг/л, во втором — 3 мг/л.

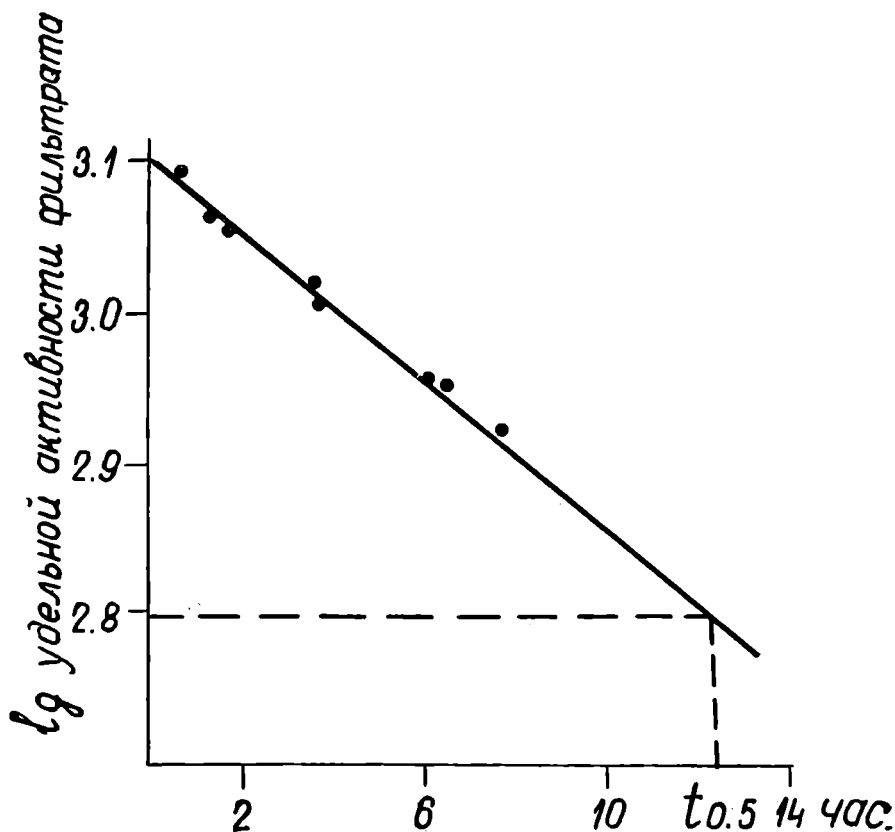


Рис. 1. Графическое определение времени оборота фосфатов в пробе воды

Активность воды, стерилизованной нагревом, незначительно снизилась в самом начале экспозиции и затем в течение 10 часов оставалась неизменной. В контроле скорость поглощения  $^{32}\text{P}$  изменялась по экспоненте (рис. 2). Аналогичные результаты получены с водой, фиксированной сулемой (рис. 3). Данные опытов свидетельствуют о биотической природе экспоненциального поглощения фосфатов. Абиотическая сорбция фосфатов при нанесении данных поглощения  $^{32}\text{P}$  на график отсекалась при пересечении прямой с осью ординат. Это позволяло внести поправку на абиотическую сорбцию, если последняя имела место.

Многочисленные определения, выполненные в разные сезоны, показали широкий диапазон колебаний времени оборота — от нескольких минут до нескольких дней — и скорости оборота фосфатов — от 0,05 до 250 мкг Р/л в час. В связи с этим необходимо было изучить влияние температурного фактора на исследуемый процесс.

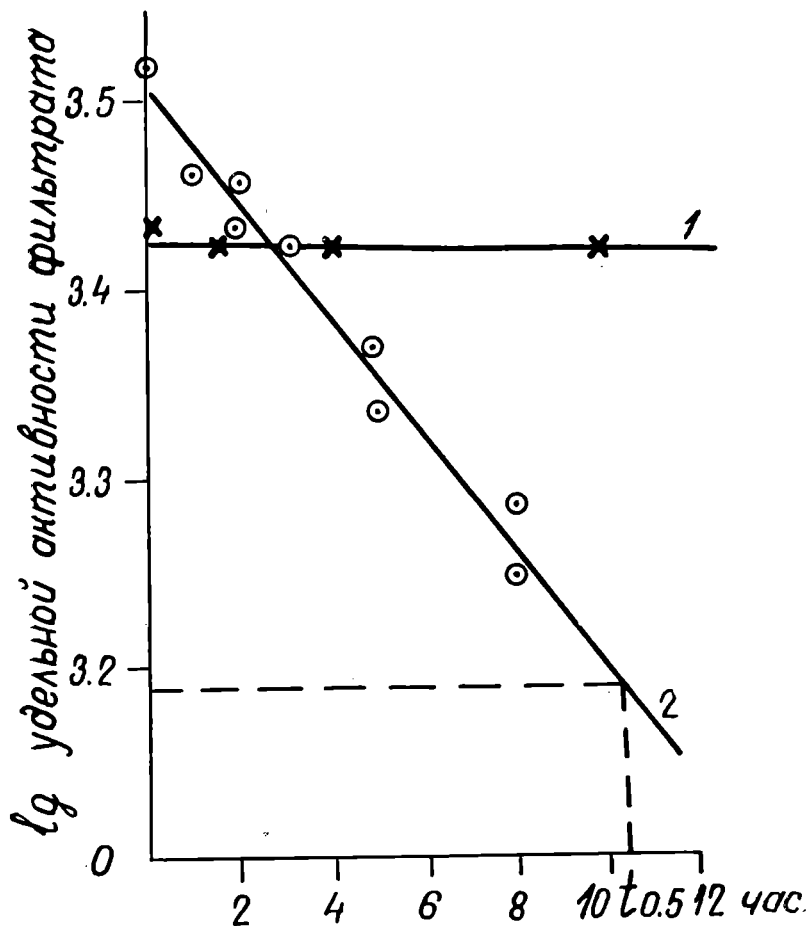


Рис. 2. Поглощение фосфатов в природной воде  
1—вода, стерилизованная нагревом; 2—контроль.

Наблюдения в лабораторных условиях показали, что в пробах, отобранных зимой и предварительно выдержанных при температуре опыта, повышение температуры на 10—15°C вызывало увеличение скорости оборота фосфатов в 2—5 раз, в летних пробах такое же понижение температуры замедляло процесс в 2—3 раза. Результаты одного из опытов представлены в табл. 1 и на рис. 4.

Из приведенных данных следует, что температура — существенный фактор скорости оборота фосфатов, под влиянием которого интенсивность процесса в общем изменяется согласно правилу Вант-Гоффа. Однако сопоставление результатов опыта с летней и зимней водой в близких температурных условиях (табл. 1) свидетельствует о ведущей роли биотического фактора.

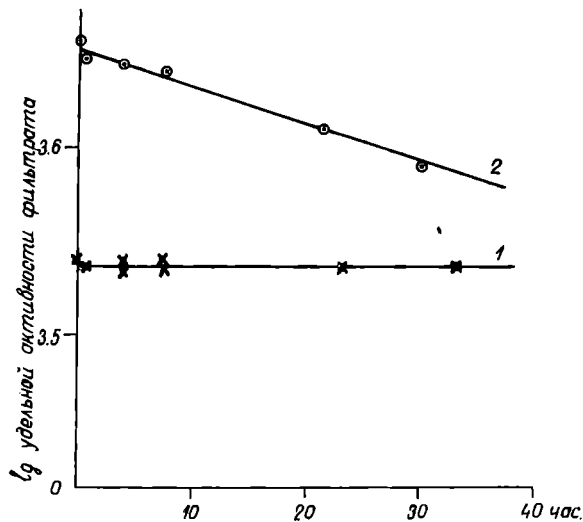


Рис. 3. Поглощение фосфатов в природной воде  
1 — вода, фиксированная сулемой (0,5 мл насыщенного раствора/л); 2 — контроль

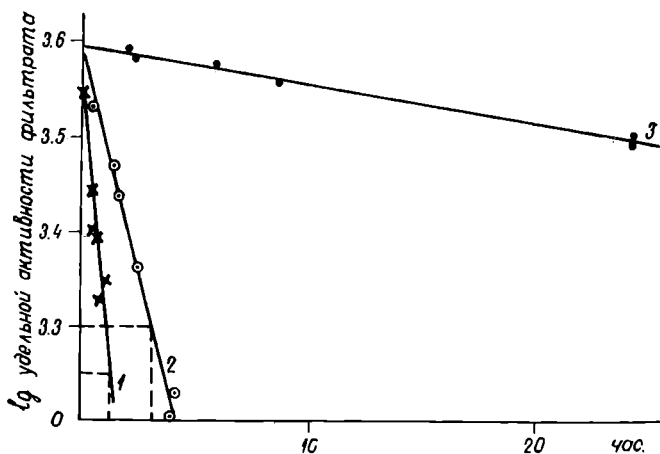


Рис. 4. Влияние температуры на скорость поглощения фосфатов

1 и 2 — опыты с водой, отобранной летом; температура 1 опыта — 17,5°C, 2 — 3—4°C; 3 — опыт с водой, отобранной зимой, температура опыта 0,5—2,5°C

## Влияние температуры на скорость оборота фосфатов

Дата отбора пробы	Температура опыта	Р <sub>О<sub>4</sub></sub> , мкгР/л	Время оборота, час.	Скорость оборота, мкгР/л в час
2.VIII	17,5	17	1,65	10,3
2.VIII	3—4	17	4,36	3,8
6.XII	0,5—2,5	38	123,0	0,28

## Результаты исследований

Наиболее полные сведения о содержании фосфора в воде Рыбинского водохранилища относятся к 1970 году, в котором пробы отбирались во время регулярных стандартных рейсов, охватывающих как главную часть водоема, так и речные плесы (табл. 2, 3).

Величина средне-взвешенного по объему содержания общего фосфора во всем водохранилище в 1970 г. оказалась почти такой же, как и в 1965 г [12]—43 и 41 мкг Р/л соответственно. В весенний период 1970 г. наблюдались сравнительно низкие концентрации общего фосфора в речных плесах, что, по-видимому, обусловлено высокой водностью и особенностями снеготаяния. Как и в 1965 г., максимальные количества характерны для Волжского плеса. Отличительной чертой режима фосфора в Рыбинском водохранилище является бедность фосфатами (табл. 3).

В Ивановском водохранилище по данным 1968—1974 гг. средневзвешенное содержание общего фосфора и фосфатов (мкг Р/л) составило:

	Весна	Лето	Осень	Зима	Средн. за год	Число проб
Р общий	80	101	75	75	83	280
Р(Р <sub>О<sub>4</sub></sub> )	18	38	32	52	35	259

Таким образом в Ивановском водохранилище и Волжском плесе Рыбинского концентрации фосфора примерно в 2 раза выше, чем в основной водной массе последнего, что обусловлено большей степенью освоенности волжского водосбора и влиянием других антропогенных факторов [4].

Систематические определения времени и скорости оборота фосфатов производились в Волжском плесе Рыбинского водохранилища на русловой глубоководной станции у с. Коприно (табл. 4).

В течение года величина скорости оборота колебалась в широких пределах. Летом процесс протекал наиболее активно. Первый максимум интенсивности фосфатного обмена совпал с высоким уровнем деструкционных процессов, второй — в начале августа — сопровождался массовым развитием синезеленых [8]. Осенью ско-

Т а б л и ц а 2

Содержание общего фосфора в Рыбинском водохранилище в 1970 г. (мкг Р/л)

Сезон	Плещы										Все водохранилище				
	Моложский			Шекснинский			Волжский			Главный					
	число проб	мин-макс. средн.		число проб	мин-макс. средн.		число проб	мин-макс. средн.		число проб	мин-макс. средн.				
		мин.	макс.		мин.	макс.		мин.	макс.		мин.	макс.			
Весна (V)	2	23	26	2	23	28	4	48	79	4	30	48	12	23	79
		25			26			61			40			40	
Лето (VI, VII)	8	35	46	7	25	58	4	71	88	20	24	63	39	24	88
		42			42			80			37			41	
Осень (IX, X)	6	40	46	6	35	63	3	68	85	15	35	68	30	35	85
		44			47			76			50			53	
Зима (I, II, III) 1971 г.	2	35	49	—	—	—	2	62	74	6	20	48	10	20	74
		42						68			32			36	
Среднее		25	49	—	23	63		48	88		20	68		20	88
		38			38			71			40			43	

Содержание фосфатов в Рыбинском водохранилище в 1970 г. (мкг Р/л)

Сезон	Плещы										Все водохранилище	
	Моложский		Шекнинский		Волжский		Главный		число проб	мин.—макс. среднее		
	число проб	мин.—макс. средн.	число проб	мин.—макс. средн.	число проб	мин.—макс. средн.	число проб	мин.—макс. средн.				
Весна (V)	3	$\frac{1-2}{2}$	4	$\frac{4-15}{8}$	8	$\frac{5-22}{9}$	11	$\frac{1-10}{5}$	25	$\frac{1-22}{6}$		
Лето (VII, VIII)	7	$\frac{1-7}{2}$	8	$\frac{1-11}{3}$	4	$\frac{11-30}{22}$	20	$\frac{1-6}{2}$	39	$\frac{1-30}{4}$		
Осень (IX, X)	6	$\frac{2-21}{9}$	6	$\frac{3-24}{9}$	3	$\frac{31-43}{38}$	15	$\frac{0^*-22}{9}$	30	$\frac{0^*-43}{9}$		
Зима (I, II, III 1971 г.)	2	$\frac{29-30}{29}$	—	—	4	$\frac{22-41}{35}$	12	$\frac{3-17}{6}$	18	$\frac{3-41}{10}$		
Среднее		$\frac{1-30}{10}$		$\frac{1-24}{7}$		$\frac{5-43}{26}$		$\frac{0^*-22}{6}$		$\frac{0^*-43}{7}$		

\* Аналитический нуль.



рость оборота заметно снизилась, зимой ее величина была минимальна. Таким образом, годовой ход изменения интенсивности обмена фосфатов соответствовал сезонному циклу биотических процессов в водоеме. В среднем за период вегетации скорость оборота фосфатов составила 1,85 мкг Р/л в час. При такой интенсивности обмена количество минерального фосфора, содержащееся в Волжском плесе (в среднем 21 мкг Р/л), будет оборачиваться примерно 2 раза в сутки.

Т а б л и ц а 4

Скорость оборота фосфатов в Волжском плесе Рыбинского водохранилища, 1971 г.

Дата	Время оборота, час	Скорость оборота, мкг Р/л в час
5.V	30,7	0,91
17.V	9,0	0,67
7.VI	16,0	0,47
21.VI	2,5	4,8
13.VII	24,0	1,2
19.VII	26,8	1,2
2.VIII	2,3	7,8
9.VIII	6,5	2,0
7.IX	79,0	0,68
27.IX	69,0	0,42
11.X	154,8	0,24
15.XII	427,0	0,08
27.1—70 г.	741	0,05

Параллельные определения интенсивности фотосинтеза и продукции бактерий в пункте наблюдений [8] позволили сравнить количество потребляемого фосфора, установленное по скорости оборота, с содержанием его в продуцируемой биомассе фитопланктона и бактерий. При расчете содержания фосфора в биомассе фитопланктона использованы результаты определения фосфора в сетном сестоне, собранном на Рыбинском водохранилище в период массового развития диатомовых и синезеленых (табл. 5)<sup>1</sup>, а также сведения об участии этих групп водорослей в создании первичной продукции водохранилища [10]. Содержание фосфора в бактериальной биомассе принято равным 2% от сухого веса [6].

Содержание фосфора в диатомовых и синезеленых, собранных в Волжском плесе, примерно в три раза превышало таковое в фитопланктоне остальной части водохранилища. Это, по-видимому, обу-

<sup>1</sup> Анализ проб сестона производился В. М. Михайловой

словлено более высокими концентрациями общего и фосфатного фосфора в Волжском плесе (табл. 2, 3).

В органическом веществе, создаваемом водорослями, и в бактериальной биомассе фосфор содержался в количестве 11 мкг/л (табл. 6).

Т а б л и ц а 5

Содержание фосфора в сестоне Рыбинского водохранилища в период массового развития диатомовых и синезеленых (среднее из 3—7 проб, 1967—1971 гг.)

Место отбора проб	Преобладающая группа водорослей	Потеря при прокаливании в % от сухого веса	Фосфор в %	
			от сухого веса	от органического вещества
Волжский плес	диатомовые	48,4	0,68	1,40
То же	синезеленые	86,9	1,28	1,47
Шекснинский и Главный плесы	диатомовые	54,2	0,20	0,37
То же	синезеленые	84,9	0,41	0,48

Установленное по скорости поглощения  $^{32}\text{P}$  среднесуточное потребление фосфатов составило около 44 мкг Р/л. Таким образом, по ориентировочным расчетам, утилизация фосфора на энергетический и конструктивный обмен в 4 раза превышала наличие фосфорных соединений в биомассе планктона (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

Содержание фосфора в биомассе, продуцируемой в Волжском плесе (среднее за вегетационный период 1971 г.)

Продуценты	Средняя продукция за сутки		
	С, мкг/л	органическое вещество, мкг/л	Р, мкг/л
Фитопланктон	150	375	5,4
Бактерии	106,7	266,7	5,8

П р и м е ч а н и е. Данные о продукции заимствованы из работы Г. Л. Марголиной [8].

Данные об интенсивности фосфатного обмена в других плесах Рыбинского водохранилища носят эпизодический характер. В мае 1971 г. в Главном плесе при содержании фосфатов на пределе чувствительности определения скорость оборота колебалась от 1 до 7 мкг Р/л в час, тогда как в Моложском и Шекснинском плесах при отсутствии растворенного фосфора (аналитический нуль) поглощение добавленного  $^{32}\text{P}$  было мгновенным. В июне скорость оборота

фосфатов во всех плесах выражалась близкими величинами (табл. 7), составляя в среднем 0,6 мкг Р/л в час. Однако, в отдельные краткосрочные периоды процессы, связанные с фосфатным обменом, достигали крайней напряженности. Так, в конце июля 1970 г. в речных плесах скорость оборота достигала 23—133, а в 1972 г. — 37—250 мкг Р/л в час. В основном эти периоды совпадали с массовым развитием водорослей и почти полным исчерпанием ортофосфатов в воде. Необычайно жаркий и маловодный 1972 г. отличался повышенной интенсивностью фосфатного обмена не только в период массового развития синезеленых (июль), но и в июне, когда скорость оборота фосфатов в воде Главного плеса более, чем в 10 раз, превышала величины, полученные в 1973 г.

Таблица 7

Скорость оборота фосфатов в воде Рыбинского водохранилища, 1973 г.

Станция	Дата	Горизонт	PO <sub>4</sub> , мкг Р/л	Время оборота, час.	Скорость оборота, мкг Р/л в час
Волжский плес, Коприно	14/VI	пов.	10	15,9	0,63
		придон.	9	14,8	0,61
Главный плес, Наволок	20/VI	пов.	10	16,6	0,60
		придон.	7	11,5	0,61
Брейтово	20/VI	пов.	10	14,2	0,70
		придон.	10	16,8	0,60
Моложский плес, Противье	21/VI	пов.	34	77,7	0,43
		придон.	22	35,6	0,63
Шекснинский плес, Мякса	22/VI	пов.	12	15,4	0,78
		придон.	12	14,6	0,82

Высокая оборачиваемость фосфатов наблюдалась в прибрежной зоне, защищенной от волнобоя [3]. Однако, достоверность высоких величин скорости оборота (порядка нескольких десятков и сотен мкг Р/л в час) вызывает сомнения по ряду причин: прежде всего из-за недостаточной точности определения фосфатов при низких концентрациях, а также завышения их количества вследствие наличия растворенных органических соединений, определяемых как реактивный минеральный фосфор [26, 27]. Кроме того в период цветения при очень высокой скорости поглощения фосфатов и следовом содержании их в воде (менее 1—3 мкг Р/л), возможно, нарушается фосфатное равновесие (поглощение не компенсируется выделением), и в этом случае скорость потребления <sup>32</sup>P не будет отвечать величине скорости оборота.

Не располагая достаточным материалом для расчета средней интенсивности фосфатного обмена для водохранилища в целом, це-

лесообразно для характеристики масштабов этого процесса сопоставление данных о суммарном поступлении общего фосфора с речным стоком и содержании этого элемента в продуцируемой биомассе. Поступление фосфора рассчитывалось на основе данных о приходных составляющих водного баланса и средних для каждого сезона концентраций фосфора в верховьях речных плесов. Выделение из донных отложений не учитывалось. Как показали наблюдения Н. А. Трифоновой [13], выделение азота из донных отложений в летние месяцы составило примерно 5% от суммарного поступления. Незначительная роль этого фактора в балансе азота Рыбинского водохранилища, по-видимому, обусловлена бедностью органического вещества отложений биогенными элементами и относительно благоприятным кислородным режимом в придонном слое. Это позволяет предположить, что значение донных отложений в приходной части баланса фосфора также невелико и учет этого фактора не внесет существенных изменений в результаты приведенных ниже расчетов.

Наличие общего фосфора в водоеме на I/IV 1970	составило	349,4 т
Поступление с речным стоком за период IV—XI 1970		1052,7 т
Поступление с атмосферными осадками (IV—XI)		61,5 т
Всего		1463,6 т

При расчете содержания фосфора в продуцируемой биомассе (табл. 8) использованы данные С. И. Кузнецова и др. [7] о продукции фитопланктона и бактерий и учтено различие накопления фосфора планктоном в разных плесах (табл. 5).

Таблица 8

**Содержание фосфора в биомассе, продуцируемой в Рыбинском водохранилище за вегетационный период 1970 г.**

Продуценты	Продукция		
	С, тыс. т	органическое вещество, тыс. т	Р, т
Фитопланктон	350	825	6450
Бактерии	99	250	5500
Всего		1075	11950

Итак, в 1970 г. содержание фосфора в органическом веществе, создаваемом в водохранилище, примерно в 8 раз превосходило суммарное количество фосфора, имеющееся в водоеме и поступившее в него за вегетационный период. Следует иметь в виду, что при сопоставлении указанных величин не учитывались потребление фосфатов в процессе обмена, попытка оценить которое была сделана в Волжском плесе Рыбинского водохранилища и рассматривалась выше.

В Ивановском водохранилище — водоеме более высокой трофии определение скорости оборота фосфатов производилось во время экспедиционных рейсов. Однако несмотря на эпизодический характер, имеющийся материал дает некоторое представление о порядке величин и сезонных изменениях этого показателя.

Весной 1970 г. при низком содержании в воде фосфатов скорость оборота колебалась в широких пределах от 0,5 до 35,7 мкг Р/л в час. Максимальная величина отмечена у Городни — пункте, расположенном поблизости от места выпуска сточных вод г. Калинина [2]. Весной 1971 г. скорость оборота не превышала 5 мкг Р/л в час (табл. 9). В этот период сбор материала проводился во время двух рейсов от верховья до плотины. Во второй срок наблюдений (через 6 дней) в озерной части водохранилища от Конакова до плотины произошло снижение содержания фосфатов и увеличение скорости оборота.

Одновременно на тех же станциях В. М. Кудрявцевым проводились исследования продукционно-деструкционных процессов, результаты которых были любезно нам предоставлены. Это позволило сопоставить интенсивность фосфатного обмена и продукционно-деструкционных процессов (табл. 10). Отношение количества фосфора, поглощенного за сутки планктоном, к содержанию этого элемента в суточной продукции фитопланктона и бактерий рассчитывалось на основе данных о содержании фосфора в сетном планктоне, собранном во время цветения диатомовых и синезеленых, и значении этих групп в создании первичной продукции Ивановского водохранилища [10]. Содержание фосфора в фитопланктоне Ивановского водохранилища оказалось практически таким же, как и в Волжском плесе Рыбинского водохранилища.

Повышение скорости оборота фосфатов сопровождалось снижением интенсивности фотосинтеза (табл. 10). При этом, судя по от-

Таблица 9

**Время и скорость оборота фосфатов в воде Ивановского водохранилища, 1971 г.**

Станция	Дата	Р <sub>О<sub>4</sub></sub> мкг Р/л	Время оборота, час	Скорость оборота, мкг Р/л в час
Выше г. Калинина	10/V	3	3,4	0,88
То же	11/V	1	1,5	0,67
Городня	9/V	15	24,0	0,63
То же	12/V	16	18,0	0,89
Конаково	7/V	12	6,5	1,84
То же	13/V	4	0,8	5,00
Корчеца	7/V	10	6,7	1,49
То же	13/V	7	2,3	3,04
5 км выше плотины	7/V	10	3,6	2,78
То же	13/V	4	0,9	4,44

**Первичная продукция и деструкция органического вещества и скорость  
оборота фосфатов в воде Иваньковского водохранилища**

Станция	Скорость оборота фосфатов, мкг Р/л в час	Первичная продукция, мг С/л в сутки	Деструкция органического вещества, мг С/л в сутки	Бактериальная ассимиляция СО <sub>2</sub> , мкг С/л в сутки	Р поглощенный Р клеток
---------	--	--	--	--	---------------------------

7 мая 1971 г.

Конаково	1,84	0,272	0,082	1,07	4,2
Корчева	1,49	0,392	0,056	1,10	2,4
5 км выше плотины	2,78	0,296	0,131	1,05	5,8

13 мая 1971 г.

Конаково	5,00	0,115	0,037	1,00	23,6
Корчева	3,04	0,116	0,113	1,09	14,3
5 км выше плотины	4,44	0,114	0,113	1,10	21,3

Таблица 11

**Скорость оборота фосфатов в воде Иваньковского водохранилища в летний период**

Станция	Дата	Р О <sub>4</sub> мкг Р/л	Время оборота, час	Скорость оборота, мкг Р/л в час
Волга выше г. Калинина	3.VII — 1969	12	9,8	1,22
Городня	1.VII	20	12,7	1,57
Конаково	27.VI	33	29,5	1,12
То же	29.VI	32	30,0	1,07
Канал ГРЭС	27.VI	35	34,2	1,02
То же	29.VI	37	28,4	1,30
5 км выше плотины	26.VI	17	34,3	0,50
То же	27.VI.1975	7	5,8	1,21
"	27.VI — 1976	41	16,0	2,56
"	22.VIII — 1975	28	16,6	1,69
"	27.VIII — 1976	53	64,3	0,82
Шошинский плес	26.VI — 1975	4,5	0,3	15,00
То же	29.VI — 1976	7	1,1	6,36
"	1.VIII — 1975	32	4,5	7,11

ношению Р поглощенного к Р клеточному, резко возросли затраты на энергетический обмен. Наиболее отчетливо преобладание энергетического обмена над конструктивным наблюдалось у Конакова, где снизилась не только первичная продукция, но и деструкция органического вещества при сохранении близких величин бактериальной ассимиляции  $\text{CO}_2$  в оба срока наблюдений. Можно предположить, что полученные данные отражают изменение затрат фосфора на энергетический и конструктивный обмен на разных стадиях развития популяций.

Летом скорость оборота фосфатов была примерно такой же, как и в весенний период (табл. 11). Наибольшие величины характерны для мелководного высокопродуктивного Шошинского плеса.

В июне средняя скорость оборота в основной части Ивановковского водохранилища (без Шошинского плеса) в 2 раза выше, чем в Рыбинском (табл. 7).

Необычайно высокая интенсивность фосфатного обмена имела место осенью маловодного и жаркого 1972 г. (табл. 12). Максимальные величины скорости оборота наблюдались выше Калинина (в зоне выклинивания подпора) и в районе водозабора ГРЭС, где усиливается гидродинамическая активность водных масс. Это повышение возможно, если происходит диффузное поглощение фосфатов. Такой механизм поглощения имеет место при достаточно высокой концентрации последних.

Т а б л и ц а 12

**Скорость оборота фосфатов в воде Ивановковского водохранилища  
осенью 1972 г.**

Станция	Дата	$\text{PO}_4$ мкг Р/л	Время оборота, час	Скорость оборота, мкг Р/л в час
Волга выше г. Калинина	11.IX	10	0,6	16,66
Городня	10.IX	47	23,7	1,98
Конаково	9.IX	21	1,0	21,00
Корчева	9.IX	54	6,6	8,18
5 км выше плотины	9.IX	25	7,6	3,29

Следует отметить, что в течение всего периода вегетации в Ивановском водохранилище не удалось обнаружить резких максимумов скорости оборота, таких как в Рыбинском, возможно, из-за недостаточно частых наблюдений. С другой стороны, можно полагать, что такой ход изменения интенсивности фосфатного обмена свойствен водоему более высокой трофности.

Для характеристики активности бактериальных популяций во время осеннего рейса 1972 г. проведены определения потенциальной скорости поглощения растворенных органических соединений по методу Хобби и Райта [17]. В работе использовалась Д-глюкоза —  $1^{14}\text{C}$ . Обнаружена тесная корреляционная связь ( $r=0,87$ ,  $p=$

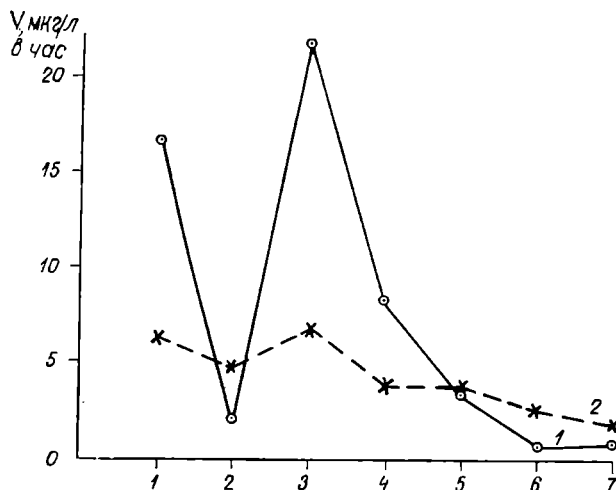


Рис. 5 Скорость оборота минерального фосфора (1) и поглощения глюкозы (2) в волжской воде на участке от г. Калинина до с. Коприно

На оси абсцисс пункты отбора проб: 1 — выше Калинина, 2 — Городня, 3 — Конаково, 4 — Корчева, 5 — выше Ивановской плотины, 6 — выше Угличской плотины, 7 — Коприно

$\approx 0,01$ ) между скоростью поглощения глюкозы и оборота фосфатов (рис. 5), хотя пределы колебаний последней были значительно шире (0,7—21,8 мкг Р/л в час), чем скорость поглощения глюкозы (1,7—6,7 мкг глюкозы/л в час). Наличие связи свидетельствует о том, что в период наблюдений (IX. 1972) обмен фосфатов преимущественно связан с микробиальными процессами распада органического вещества.

### Заключение

В мезотрофном Рыбинском водохранилище, воды которого бедны соединениями фосфора и организмы фитопланктона, судя по содержанию в них фосфора, испытывают дефицит в этом элементе, средний уровень скорости оборота фосфатов сравнительно низок, но в отдельные периоды, редкие и непродолжительные, скорость поглощения возрастает и достигает нескольких сотен мкг Р/л в час. По-видимому, в эти периоды, совпадающие с массовым развитием фитопланктона и практически полным исчерпанием запаса ортофосфатов в воде, происходит нарушение фосфатного равновесия — скорость поглощения значительно превышает скорость выделения; в дальнейшем фосфатная стабильность достигается за счет бактериопланктона. Содержание в воде минерального фосфора вероятно следует отнести к ведущим факторам, обуславливающим свойственный Рыбинскому водохранилищу уровень продукционно-деструк-



ционных процессов. Сопоставление данных о количестве фосфора, поступающего в водоем с речным стоком, и содержании этого элемента в органическом веществе, продуцируемом за период вегетации, свидетельствует о многократном повторном использовании соединений фосфора планктонными организмами.

Применение  $^{32}\text{P}$  позволило приближенно оценить затраты фосфора на энергетический и конструктивный обмен. Для Волжского плеса Рыбинского водохранилища в среднем за вегетационный период они превысили содержание фосфора в биомассе, продуцируемой за то же время, в 4 раза. При такой интенсивности обмена среднее содержание фосфатов, равное 21 мкг Р/л, оборачивается примерно 2 раза в сутки.

В Ивановском водохранилище при сравнительно высокой обеспеченности фосфатами и соответственно более высоком содержании фосфора в фитопланктоне, средний уровень скорости оборота несколько выше, чем в Рыбинском. В отличие от последнего здесь не отмечено резких максимумов. Наибольшие значения — порядка десятков мкг Р/л в час — характерны для мелководного высокопродуктивного Шошинского плеса. Судя по содержанию фосфатов в воде и планктоне, приближенная оценка затрат фосфора на энергетический и конструктивный обмен, проведенная для Волжского плеса Рыбинского водохранилища, по-видимому, может быть применима для водных масс Ивановского.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бикбулатов Э. С. О методе определения общего фосфора в природных водах. — Гидрохим. материалы., 1974, т. 60, с. 167—173.
2. Былинкина А. А. Скорость оборота минерального фосфора в Ивановском водохранилище в весенний период. — Информ. бюлл. «Биол. внутр. вод», 1972, № 16, с. 45—47.
3. Былинкина А. А., Генкал Л. Ф. Скорость оборота минерального фосфора и поглощения глюкозы в прибрежной и глубоководной части Рыбинского водохранилища. — В кн.: Биогенные элементы и органическое вещество в водохранилищах. Рыбинск, 1974, с. 7—16.
4. Драчев С. М., Былинкина А. А., Трифонова Н. А., Кудрявцева Н. А. Влияние антропогенных факторов на содержание биогенных элементов и солевой состав водохранилищ Волги. — В кн.: Биологические продукционные процессы в бассейне Волги. Л., 1976, с. 18—24.
5. Драчев С. М., Разумов А. С., Скопинцев Б. А. Приемы санитарного исследования водоемов. М., 1960, 355 с.
6. Кузнецов С. И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л., 1970, 440 с.
7. Кузнецов С. И., Романенко В. И., Кузнецова Н. С. Численность бактерий, продукция и деструкция органического вещества в Рыбинском водохранилище в 1970 г. В кн.: Факторы формирования водных масс и районирование внутренних водоемов. Л., 1974, с. 95—111.
8. Марголина Г. Л. Микробиологическая характеристика прибрежной зоны Рыбинского водохранилища. — В кн.: Геохимическая деятельность микроорганизмов в водоемах и месторождениях полезных ископаемых. М., 1973, с. 315—326.
9. Петухова Л. А. Об использовании ультрафиолетового облучения при определении общего фосфора в поверхностных водах. — Информ. бюлл. «Биол. внутр. вод», 1972, № 16, с. 71—73.
10. Пырина И. Л. Первичная продукция фитопланктона в Ивановском, Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах в зависимости от некоторых факторов.

— В кн.: Продукцирование и круговорот органического вещества во внутренних водоемах. М. — Л., 1966, с. 249—270.

11. Рыбинское водохранилище и его жизнь. Л., 1972, 274 с.

12. Скопинцев Б. А., Карпов А. В., Тимофеева С. Н. Опыт применения автоклава для минерализации органических веществ природных вод — Гидрохим. матер., 1963, т. 35, с. 183—199.

13. Трифонова Н. А. Соединения азота в Рыбинском водохранилище. Автореф. канд. дисс. М., МГУ, 1974, с. 28.

14. Chamberlain W. and Shapiro V. On the biological significance of phosphate analysis comparison of standard and now methods with bioassay. Limnol. Oceanogr. 1969, v. 14, N 6, p. 921—927.

15. Coffin C. C., Hayes F. R., Sodrey L. H., Whiteway S. G. Exchange of materials in a lake as studied by the addition of radioactive phosphorus. Canadian Journ Research. 1949, v. 27, N 4, p. 207—222.

16. Hayes F. R., McCarter A. A., Comeran M. L., Livingstone D. A. On the kinetics of phosphorus exchange in lakes. Journ. Ecology. 1952, v. 40, N 1, p. 202—216.

17. Hobbie J. E., Wright R. T. A new method for study of bacteria in lakes: description and results. Mitt. Internat. Verein. Limnol., 1968, v. 14, p. 64—71.

18. Hutchinson G. E., Bowen V. A quantitative radiochemical study of the phosphorus cycle in Linsley Pond. Ecology, 1950, v. 31, N 2, p. 194—203.

19. Lean D. R. S. Phosphorus dynamics in lake water. — Science, 1973, v. 179, N 4074, p. 678—680.

20. Lean D. R. S. Movements of phosphorus between its biologically important form in lake water. J. Fish. Res. Bd. Can. 1973, v. 30, N 10, p. 1525—1536.

21. Lean D. R. S. and Rigler F. H. A test of the hypothesis that abiotic phosphate complexing influences phosphorus kinetics in epilimnetic lake water. Limnol. Oceanogr., 1974, v. 19, N 5, p. 784—788.

22. Menzel D. W., Corwin N. The measurement of total phosphorus in sea water. based on the liberation of organically bound fractions by persulfate oxidation. Limnol. Oceanogr., 1965, v. 10, N 2, p. 281—282.

23. Pomeroy L. R. Residence time of dissolved phosphate in natural water. — Science, 1960, v. 131, N 3415, p. 1731—1732.

24. Rigler F. H. A tracer of the phosphorus cycle in lake water. Ecology, 1956, v. 37, N 3, p. 550—562.

25. Rigler F. H. The phosphorus fractions and the turnover time of inorganic phosphorus in different types of lakes. — Limnol. Oceanogr., 1964, v. 9, N 4, p. 511—518.

26. Rigler F. H. Radiobiological analysis of inorganic phosphorus in lake water. Verh. int. Verein. theor. angew. Limnol., 1966, 16, p. 465—470.

27. Rigler F. H. Further observations inconsistent with the hypothesis that the molybdenum blue method measures orthophosphate in lake water. 1968, Limnol. Oceanogr., v. 13, N 1, p. 7—13.

28. Schindler D. W., D. R. S. Lean. Biological and chemical mechanisms in eutrophication of freshwater lakes. — Ann. N. Y. Acad. Sci., 1974, 250, p. 129—135.

29. Strickland J. D. H. and Parsons T. R. A Practical Handbook of seawater analysis. Bull. Fish. Res. Bd. Can., 1968, N 167, p. 311.

30. Watt W. D., Hayes F. R. Tracer study of the phosphorus cycle in sea water. — Limnol. Oceanogr., 1963, v. 8, N 2, p. 276—285.

## О влиянии донных отложений на содержание биогенных элементов в воде

Влиянию дна на химический и биологический режим водоемов придается существенное значение. Высказываются предположения о решающей роли донных отложений в определении трофического состояния озер [5, 14, 25, 26, 20].

Задача нашей работы заключалась в изучении влияния иловых отложений на содержание биогенных элементов в водохранилищах. Исследования проводились на Ивановском и Угличском водохранилищах в июле и октябре 1974 г., на 4—5 русловых станциях: в 5 км выше Угличской плотины, в 5 км выше Ивановской плотины, у Корчевы — в районе влияния сбросных вод Конаковской ГРЭС, выше водозабора ГРЭС и в устье наиболее продуктивного Шошинского плеса.

В процессе регенерации биогенных элементов в донных отложениях схематически выделяют 2 стадии. Одна из них, включающая микробиальную деятельность и физико-химические реакции, определяет концентрацию биогенов в поровом растворе, пропитывающем донные отложения. Вторая — заключается в переходе их из поровых растворов в водную толщу через линию раздела грунт — вода. В соответствии с этим в программу наших исследований включено изучение как иловых отложений, так и поровых растворов.

Пробы ила отбирались стратометром, по 10—15 колонок на каждой станции, что позволяло получать достаточный для анализа объем порового раствора. Кроме того уменьшалось влияние на полученные результаты пространственной неоднородности грунта. Обычно из колонки отбирали 2 слоя: 0—5 и 10—15 см. На некоторых станциях взято 4—5 слоев. Обработка ила и выделение порового раствора начиналась сразу же после отбора проб.

Как отмечал С. В. Бруевич [4], при химических исследованиях поровых растворов методика их выделения приобретает исключительно большое значение вследствие возможного изменения раствора в процессе отделения его от твердой фазы. Выделение поровых растворов проводится разными методами. Отсасывание на воронке Бюхнера и замещение спиртом или другими жидкостями имеют, по видимому, наиболее существенные недостатки. При отсасывании происходит не только испарение, но и изменение газового состава порового раствора. При замещении возможна диффузия вытесняющей жидкости в поровый раствор. Широко распространенное в океанологических исследованиях отжимание под давлением требует сложной и громоздкой аппаратуры и кроме того довольно длительно. В последние годы широко применяется центрифугирование [12, 28]. Этот метод использовался и в наших исследованиях.

По классификации П. А. Крюкова [10], поровый раствор, т. е. вода, заключенная в донных отложениях, состоит из 2 фаз: внешней и внутренней. Внешняя фаза является свободным интермицелляр-

ным раствором, однородным по составу, внутренняя — связана с поверхностью твердых частиц и входит в состав мицелл. Последняя по составу неоднородна, концентрация в ней растворенных веществ падает от периферической части к центру частиц. При отделении этой фазы раствора наблюдается последовательное уменьшение концентраций, причем теоретически возможно выделение и совершенно чистой воды. Однако, основная масса чистой воды практически не может быть выделена. Содержание ее в разных типах илов различно. По данным О. В. Шишкиной [19], в морских осадках 80—85% иловых вод имеет постоянный состав. По определениям П. А. Крюкова, эти цифры несколько ниже, но не менее 60% [9]. В нашей работе центрифугирование проводилось в течение 30 мин. при 9 тыс. оборотов в минуту. Определения показали, что при таком режиме центрифугирования отделяется примерно 60% воды, содержащейся в иле. Для осветления полученного центрифугата проводилось повторное центрифугирование. В иловом растворе определялся фосфатный и общий фосфор, аммонийный, нитратный и общий азот, суммарное минеральное железо, реактивный кремний, общее содержание углеводов и сумма кальция и магния. Фосфаты анализировались по Дениже, нитраты — дифениламиновым методом, железо — роданидным, кремний — молибдатным, кальций и магний — трилонометрически [1]. При определении общего и аммонийного азота использован микродиффузионный способ дистилляции аммиака [17, 18]. Сожжение проб на общий фосфор проводилось персульфатным методом [24, 3]. Углеводы анализировались с сульфеноловым реактивом [30].

В донных отложениях определена влажность, объемный вес и содержание органического вещества, валового азота, фосфора, железа и марганца, а также обменного аммония<sup>1</sup>. Для установления объемного веса образец ила отбирали с помощью стального цилиндра определенного объема [8]. Органическое вещество определялось

Станция	Дата	Слой ила, см	Мп, % от абсолютно сухого веса	
			персульфатный метод	формальдоксимный метод
Иваньково	X	0—1	0,18	0,20
Корчева	VII	0—5	0,21	0,22
		10—15	0,20	0,17
Корчева	X	0—1	0,23	0,24
		2—7	0,21	0,22
		16—21	0,14	0,15
Шоша	X	0—1	0,09	0,13

<sup>1</sup> В выполнении анализов донных отложений принимали участие З. А. Митропольская и В. М. Михайлова.

<sup>2</sup> Определение Мп персульфатным методом проведено Л. А. Петуховой.

по потере при прокаливании. Прокаливание проводилось в муфельной печи при 500°C. После минерализации образцов ила с серной кислотой N, P, Fe определялись методами, использованными для поровых растворов, Mn анализировался с формальдоксидом [22]. Полученные результаты выражены в % к абсолютно сухому весу ила (табл. 1). Параллельные определения марганца, выполненные в нескольких пробах персульфатным методом [2], дали близкие результаты (см. стр. 75).

Вытеснение поглощенного аммония проводилось трехкратной обработкой илов 2 н. раствором KCl [12]. Содержание аммонийного азота, перешедшего в раствор, определялось микродиффузионным методом. Обменный аммоний рассчитывался по разности между вытесненным  $\text{NH}_4$  и содержащимся в поровом растворе.

Результаты анализов показали, что в верхних слоях иловых отложений содержание органического вещества составляет 7—14% (табл. 1). Максимальные величины характерны для предплотинной части Иваньковского водохранилища.

Количество общего азота колеблется от 0,27 до 0,50%. Наименьшие концентрации найдены в Угличском водохранилище. По содержанию общего азота илистые отложения Иваньковского и Угличского водохранилищ близки к серым и песчанистым илам Рыбинского. Количество же органического вещества в последних несколько выше, что, как отмечалось ранее [16], вызвано участием торфа в формировании всех типов отложений Рыбинского водохранилища. В соответствии с этим отношение C/N в Иваньковском водохранилище значительно уже, чем в Рыбинском. Наиболее богато азотом органическое вещество илов Шошинского плеса (4,5%).

Концентрация валового фосфора в илах составляет 0,1—0,2%. Минимальные значения свойственны Шошинскому плесу, на остальных станциях содержание его почти одинаково. Такое же количество фосфора характерно для Волжского плеса Рыбинского водохранилища. В остальной части этого водоема концентрация P примерно в 2 раза ниже — 0,06—0,11% [13, 7].

Содержание валового железа в верхнем слое иловых отложений колеблется от 3,1 до 4,7%, возрастая от верховьев к нижней части обследуемого участка. Такой же характер распределения свойствен и марганцу. Различия между летним и осенним периодом несут несущественны.

Послойный анализ отложений показал, что вниз по вертикали уменьшается количество как органического вещества, так и всех биогенных элементов. Наименьшие изменения характерны для железа (табл. 1).

Содержание обменного аммония колебалось от 20 до 226 мкг/г абсолютно сухого ила (табл. 2). В наилке количество его минимально — 24—26 мкг/г, что составляет 0,6—0,8% от валового азота. Несколько выше содержание обменного аммония в иле при наличии в нем водорослей. Так, в устье Шошинского плеса в октябре 1974 г. в верхнем слое отложений количество его достигло 102 мкг/г, т. е. 3% от N валового. Вниз по вертикали содержание обменного ам-

## Химический состав иловых отложений Иваньковского и Угличского водохранилищ

Место отбора проб	Слой ила, см	Объемный вес, г		Влаж-ность, %	Потеря при прокаливании	N	P	Fe	Mn
		нату-рально-го ила	сухого ила						
% от сухого веса									
Июль									
Выше Углич-ской плотины	2-5	1,08	0,21	80,2	10,1	0,27	0,23	4,74	,58
	10-15	1,19	0,31	68,8	8,5	0,19	0,14	4,46	0,38
Выше Ивань-ковской плоти-ны	0-5	1,11	0,24	77,8	12,5	0,38	0,23	4,10	0,19
	10-15	1,13	0,36	68,9	11,0	0,32	0,19	2,17	0,14
Корчева	0-5	1,13	0,21	81,1	11,3	0,40	0,21	4,10	0,22
	10-15	1,30	0,49	62,2	8,3	0,35	0,18	2,83	0,17
Водозабор ГРЭС	0-0,5	1,27	0,47	63,1	7,7	0,27	0,17	3,25	0,16
	0-7	1,54	0,92	40,0	3,0	0,14	0,10	1,52	0,07
Шоша у Без-бородова	0-5	1,13	0,22	80,2	11,4	0,51	0,17	3,49	0,16
	6-10	1,13	—	—	10,8	0,53	0,16	3,07	0,13
	11-15	1,36	—	—	6,0	0,18	0,09	2,36	0,12

## Октябрь

Выше Угличской плотины	0-1	1,13	0,24	78,9	9,4	0,31	0,20	4,52	,44
	2-5	1,12	0,33	70,3	8,8	0,29	0,19	—	—
	6-12	1,22	0,38	68,7	7,1	0,22	0,16	4,46	0,38
	13-18	1,32	0,54	59,1	6,2	0,15	0,12	—	—
	19-25	1,44	0,70	51,7	4,6	0,13	0,11	3,32	0,15
	26-32	1,42	0,70	55,4	4,8	0,13	0,11	3,36	0,15
Выше Иваньковской плотины	0-1,5	1,08	0,16	85,0	13,8	0,49	0,21	4,18	0,20
	2-7	1,11	0,22	80,2	13,7	0,43	0,19	4,10	0,19
Корчева	0-1	1,11	0,20	82,0	11,7	0,40	0,21	3,80	0,24
	2-7	1,11	0,25	77,8	11,1	0,39	0,21	3,80	0,22
	8-14	1,20	0,35	70,4	10,5	0,34	0,20	3,66	0,19
	16-21	1,27	0,50	61,0	9,0	0,34	0,17	3,30	0,15
Шоша у Безбородова	0-1	1,16	0,28	75,6	7,6	0,34	0,11	3,07	0,13
	2-5	1,22	0,28	77,1	6,9	0,27	,12	2,27	0,10
	6-20	1,53	0,87	43,1	3,5	0,18	0,07	1,53	0,05

## Содержание подвижных форм азота в донных отложениях

Место отбора проб	Слой ила, см	N валовый, % от сухого ила	NH <sub>4</sub> обменный			NH <sub>4</sub> порового раствора		
			% от сухого ила	% от N валового	% от Σ под- вижных форм	% от сухого ила	% от N валового	% от под- вижных форм
5 км выше Углинской плотины	0-1	0,31	2,4·10 <sup>-3</sup>	0,76	65,5	1,2·10 <sup>-3</sup>	0,38	33,5
	2-5	0,29	2,8·10 <sup>-3</sup>	0,95	79,9	0,7·10 <sup>-3</sup>	0,24	20,1
	6-12	0,22	—	—	—	1,2·10 <sup>-3</sup>	0,56	—
	13-18	0,15	4,2·10 <sup>-3</sup>	2,82	81,8	0,9·10 <sup>-3</sup>	0,62	18,2
	19-25	0,13	8,1·10 <sup>-3</sup>	6,23	91,0	0,8·10 <sup>-3</sup>	0,61	9,0
	26-32	0,13	9,4·10 <sup>-3</sup>	7,20	90,6	0,8·10 <sup>-3</sup>	0,74	9,4
5 км выше Иванов- ской плотины Корчева	0-1	0,40	—	—	—	2,6·10 <sup>-3</sup>	0,52	—
	2-7	0,43	4,5·10 <sup>-3</sup>	1,30	52,6	4,0·10 <sup>-3</sup>	0,93	47,4
	0-1	0,40	2,6·10 <sup>-3</sup>	0,63	48,4	2,7·10 <sup>-3</sup>	0,68	51,7
	2-7	0,39	7,6·10 <sup>-3</sup>	1,95	61,5	4,8·10 <sup>-3</sup>	1,23	38,5
	8-14	0,34	17,2·10 <sup>-3</sup>	5,67	73,0	6,4·10 <sup>-3</sup>	1,87	27,0
	16-21	0,34	22,6·10 <sup>-3</sup>	6,66	80,2	5,6·10 <sup>-3</sup>	1,64	19,8
Шоша у Безбородова	0-1	0,34	10,2·10 <sup>-3</sup>	3,01	92,0	0,9·10 <sup>-3</sup>	0,26	8,0
	2-5	0,27	3,1·10 <sup>-3</sup>	1,14	76,3	1,0·10 <sup>-3</sup>	0,35	23,7
	6-20	0,18	2,0·10 <sup>-3</sup>	1,08	89,0	0,2·10 <sup>-3</sup>	0,13	11,0

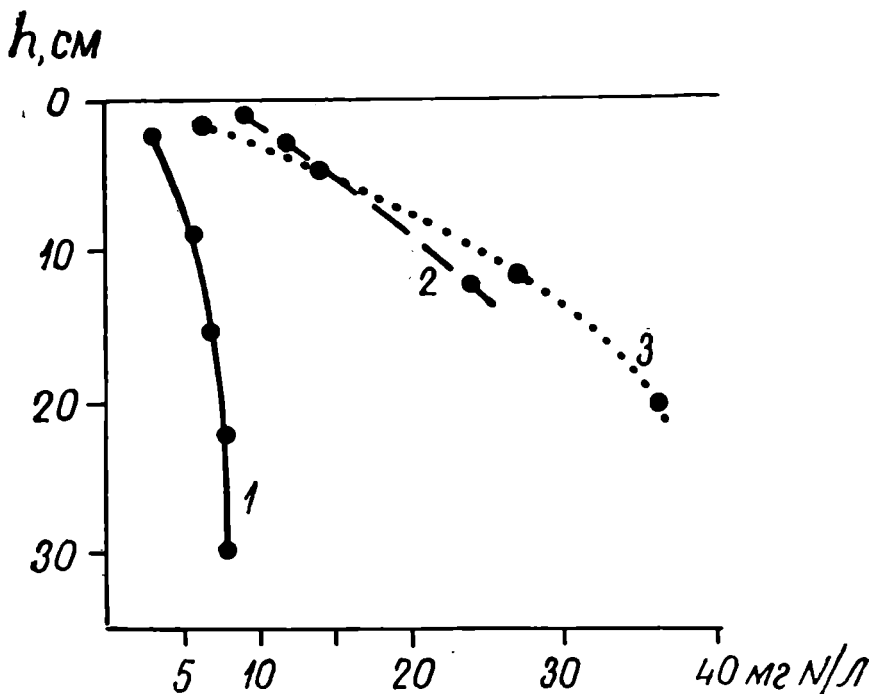


Рис. 1. Послойное распределение аммонийного азота в поровых растворах донных отложений

Станции и время отбора проб: 1— Углич, октябрь; 2 — Корчева, июль; 3 — Корчева, октябрь

мония увеличивается, достигая 90—226 мкг/г, или 6—7% от валового азота.

Результаты определения биогенных элементов показали, что в поровых растворах верхнего слоя донных отложений содержание аммонийного азота на порядок, а в некоторых случаях и на 2 порядка выше, чем в придонной воде. Максимальные величины характерны для илов в районе Корчевы (табл. 3 и 4). На всех станциях и в летний, и в осенний периоды количество аммонийного азота в поровом растворе нижних слоев значительно больше, чем в верхних. Выше Углича концентрация аммонийного азота на глубине 30—35 см возросла в 2,5 раза, а в районе Корчевы на глубине 20 см — в 6 раз по сравнению с поверхностным слоем (рис. 1).

Аммонийный азот составляет от 65 до 95% от общего азота поровых растворов. Нитратный азот отсутствует, что согласуется с окислительно-восстановительными условиями в илах: величина Eh на станции выше Угличской плотины в придонной воде была +400, в верхнем слое ила — —36, на глубине 10—15 см — —131, 30 см — —151 мв.

Сопоставление обменного аммония с концентрацией аммонийного азота в иловых растворах показывает, что на долю первого обыч-



Химический состав поровых растворов, июль 1974 г.

Место отбора проб	Проба	Слой, см	PO <sub>4</sub> мкг P/л	NH <sub>4</sub>		NO <sub>3</sub>	Fe мг/л	Si мг/л	Углеводы, мг/л	Жесткость	Ca
				мг N/л							
Выше Угличской плотины	Вода	0,5 м от дна	43	0,04	0,40	0,20	1,74	2,5	2,63	1,89	
	Поровый раствор	0—5	395	1,80	0,00	1,78	26,0	9,9	3,56	2,70	
		10—15	25	3,80	0,00	1,65	—	—	—	—	
Выше Ивановской плотины	Вода	0,5 м от дна	84	0,28	0,25	0,36	2,62	2,4	2,28	1,68	
	Поровый раствор	0—5	545	6,00	0,00	6,60	25,6	—	3,51	2,70	
		10—15	53	12,40	0,00	2,08	28,8	11,5	3,66	—	
Корчева	Вода	0,5 м от дна	78	0,42	0,15	0,43	9,0	2,70	2,26	—	
	Поровый раствор	0—5	207	11,50	0,00	6,38	19,2	11,5	4,50	—	
		10—15	55	24,10	0,00	2,83	—	—	4,27	—	
Водозабор ГРЭС	Вода	0,5 м от дна	63	0,42	0,20	0,51	2,34	2,55	2,37	1,76	
	Поровый раствор	0—5	308	1,72	0,04	1,55	—	—	—	—	
		0—7	80	1,88	0,01	0,36	—	—	—	—	
Шоша у Безбородова	Вода	0,5 м от дна	29	0,31	0,04	1,33	2,70	5,05	2,65	1,78	
	Поровый раствор	0—5	358	6,60	0,00	9,00	21,00	—	4,95	—	
		10—15	23	14,10	0,00	1,40	21,8	—	3,31	—	

Химический состав поровых растворов, октябрь 1974 г.

Место отбора проб	Проба	Слой	PO <sub>4</sub>		Р <sub>общ</sub>	NH <sub>4</sub>	N <sub>общ</sub>	Fe мг/л	Углеводы, мг/л	Жесткость	Са
			мкг Р/л								
			мг N/л								
Выше Угличской плотины	Вода	0,5 м от дна	68	84	0,04	1,16	0,03	2,25	2,56	1,92	
	Поровый раствор	0-1	365	595	3,20	4,45	1,50	12,0	4,53	3,16	
		2-5	428	650	2,95	4,55	1,50	12,45	—	—	
		6-12	178	392	5,65	7,00	1,85	13,97	4,74	3,16	
		13-18	87	275	6,50	—	—	13,30	—	—	
Выше Ивановской плотины	Вода	0,5 м от дна	49	78	0,10	1,24	0,19	2,95	2,46	1,85	
	Поровый раствор	0-1,5	236	347	4,65	5,30	3,10	12,75	4,64	3,20	
		2-7	223	347	9,90	—	6,20	12,40	4,58	3,12	
		Вода	0,5 м от дна	52	97	0,06	1,11	0,15	2,20	2,48	1,88
		Поровый раствор	0-1	186	382	6,00	—	3,60	16,50	5,57	3,99
Корчева	Поровый раствор	2-7	107	325	13,7	—	5,00	14,55	—	—	
		8-14	24	212	26,8	—	3,75	12,15	6,34	4,72	
		16-21	11	152	35,8	—	2,40	13,30	—	—	
		Вода	0,5 м от дна	15	91	0,13	1,20	0,17	4,55	3,06	2,15
	Шоша у Безбородова	Поровый раствор	0-1	104	305	2,87	—	1,80	—	4,31	2,99
	Поровый раствор	2-6	190	385	2,87	—	3,00	49,80	4,39	3,18	
		6-20	78	250	3,25	—	2,10	—	—	—	

но приходится большая часть суммы подвижных форм: 48—52% в верхнем (0—2 см) и 80—90% — в нижнем (20—30 см) слое ила. В сумме подвижные формы составляет 1—8% от валового азота донных отложений.

Содержание фосфатов в иловом растворе верхних слоев отложений в несколько раз, а иногда и на целый порядок выше, чем в придонной воде (табл. 3 и 4). В июле концентрации  $\text{PO}_4$  в поровом растворе были несколько выше, чем в октябре. И в относительном содержании фосфатов в жидкой фазе ила можно отметить тенденцию к увеличению в летний период:

Станция	Слой ила, см	P— $\text{PO}_4$ порового раствора в % от P валового в иле	
		VII	X
Выше Угличской плотины	0—5	0,07	0,06
	10—15	0,04	0,02
Выше Ивановской плотины	0—5	0,08	0,06
	10—15	0,06	—
У Корчева	0—5	0,04	0,03
	10—15	0,005	0,003
Шошинский плес	0—5	0,09	0,04

Возможно, что более высокие концентрации фосфатов в июле вызваны осаждением на дно и разложением свежих остатков отмершего фитопланктона. Этому соответствует и более высокое со-

Таблица 5

Температура, pH и содержание кислорода в придонном слое воды (0,5 м от дна)

Место отбора проб	Глубина, м	Т°	рН	О <sub>2</sub>	
				мг/л	% насыщения
Июль, 1974 г.					
Выше Угличской плотины	20,0	19,4	7,35	3,77	39,7
Выше Ивановской плотины	15,0	19,9	7,30	1,62	17,2
Корчева	16,0	20,0	7,28	1,00	10,6
Водозабор ГРЭС	12,0	19,6	7,28	0,25	2,6
Шоша у Безбородова	12,0	17,1	7,55	6,56	66,2
Октябрь, 1974 г.					
Выше Угличской плотины	20,0	13,0	7,61	8,55	79,5
Выше Ивановской плотины	16,0	12,4	7,61	8,23	75,5
Корчева	16,0	13,0	7,61	8,17	75,9
Шоша у Безбородова	9,0	11,2	7,61	9,00	76,7

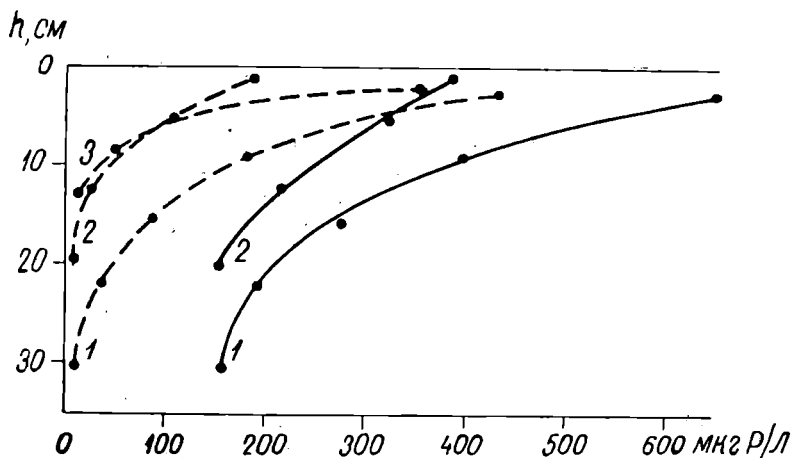


Рис. 2. Послойное распределение фосфора в поровых растворах донных отложений (октябрь)

Сплошная линия — Р общий, пунктирная — Р фосфатный. Места отбора проб: 1 — выше Углича, 2 — Корчева, 3 — Шоша у Безбородова.

держание валового фосфора в верхнем слое ила в летний период. Кроме того, повышенные концентрации фосфатов могут быть связаны с возникновением в донных отложениях восстановительных условий. В этот период содержание кислорода в придонном слое снижалось до 1,5—1,0 и даже десятых долей мг  $O_2$ /л (табл. 5). В отсутствие  $O_2$  железо фосфатов и гидратов восстанавливается до закисного, в результате чего в раствор переходят как фосфаты, так и железо. Это предположение в какой-то мере подтверждается и более высокими летними концентрациями железа в поровом растворе.

Результаты послойного анализа показывают, что в отличие от солей аммония количество фосфатов вниз по вертикали уменьшается. Выше Углича на глубине 30—35 см, а у Корчевы и в Шошинском плесе уже на глубине 20 см концентрация фосфатов снижается более, чем на порядок — до 10—15 мкг Р/л (рис. 2). Это, по-видимому, связано с меньшим содержанием фосфора в твердой фазе нижних слоев ила, так как минерализация легкоразлагающихся фосфорорганических соединений в основном заканчивается в верхних слоях. Кроме того, в нижних слоях, вероятно, происходит биологическое восстановление фосфатов. В литературе имеются данные о способности микроорганизмов в анаэробных условиях восстанавливать соли фосфорной кислоты до фосфористой и далее — вплоть до фосфористого водорода [11].

Концентрация общего фосфора в иловых растворах верхних слоев составляет 305—650 мкг Р/л, что в несколько раз (до 7) выше, чем в придонной воде. Вниз по вертикали содержание его снижается — верхние и нижние горизонты различаются в 2—4 раза (табл. 4). В верхнем слое 40—65% общего фосфора составляют фосфаты,

в нижних слоях (20—35 см) преобладает нефосфатный фосфор — до 93% от общего.

От валового содержания фосфора в илах общий фосфор поровых растворов составляет не более 0,1%, фосфатный — несколько сотых %.

Реактивное железо определено в количестве 1,5—9,0 мг/л. В июле на всех станциях максимум содержания его был в верхних слоях, осенью — в слое ниже 2 см. Количество реактивного кремния в поровом растворе колебалось от 19,2 до 28,8 мг/л, почти на порядок превышая концентрацию его в придонной воде. Общее содержание углеводов составляло в пересчете на глюкозу 9,9—16 мг/л, что в 3—7 раз превышает содержание их в воде. Лишь в устье Шоши количество углеводов достигло 50 мг/л.

Одновременно с анализом иловых вод проводилось определение количества фосфатного фосфора и аммонийного азота, выделяющихся из илов в воду в экспериментальных условиях. Стеклообразные трубки около 3 см диаметром и высотой 20 см наполнялись илом и водой в отношении 1 : 5. Ил использовался с ненарушенной структурой, наполнение водой проводилось так, чтобы не взмучивался верхний слой ила. Трубки экспонировались в течение суток в темноте при температуре водоема (11—14°). По разности концентраций в начале и конце экспозиции рассчитывалось выделение фосфатов и аммония с единицы площади ила.

Количества выделившихся фосфатов на разных станциях довольно близки — 0,50—0,88 мг P/м<sup>2</sup> в сутки. Величины выделения аммонийного азота колебались от 5 до 36 мг/м<sup>2</sup> в сутки. Полученные значения соответствовали 3—6% от количества биогенных элементов в поровом растворе колонки (табл. 6 и 7).

Результаты более длительных опытов, поставленных с илами Шошинского плеса, показывают, что в первые два дня количество выделившегося фосфора было близким к тому, что наблюдалось на других станциях. На третьи сутки, при исчерпании кислорода в придонной воде, выделение фосфатов достигло максимальной величины — 1,7 мг P/м<sup>2</sup> в сутки. Наряду с влиянием указанных выше химических факторов увеличение количества фосфатов, возможно, связано со способностью микроорганизмов выделять при наступлении анаэробных условий значительную часть клеточного фосфора [29]. Затем скорость выделения вновь снизилась и в среднем за период с четвертого по одиннадцатый день составила ту же величину, что и в начале опыта — 0,59 мг P/м<sup>2</sup> в сутки. Общее количество фосфатов, выделившихся за 10,7 суток, соответствовало запасу их в поровых растворах.

Выделение аммонийного азота по мере снижения содержания растворенного в воде кислорода непрерывно увеличивалось и в анаэробных условиях составило 45,5 мг/м<sup>2</sup> в сутки; общее количество аммонийного азота, выделившегося за 10,7 суток, вдвое превышало содержание его в иловом растворе, то есть в процесс обмена был вовлечен аммоний, находившийся в поглощенном состоянии. Примерно такие же величины были получены нами на соответствующих

Выделение фосфатов из донных отложений

Место отбора проб	Результаты эксперимента				Расчетные данные	
	Длительность опыта, сутки	мкг Р за время экспозиции	мкг Р/м <sup>2</sup> в сутки	% от исходного содержания		мкг Р/м <sup>2</sup> в сутки
				Р <sub>04</sub> в порошом растворе	Р общего в иле	
Выше Угличской плотины	1	0,42	808	3,3	0,002	565
Выше Ивановской плотины	1	0,46	870	6,0	0,003	355
Корчева	1	0,26	500	4,7	0,001	255
Шоша у Безбородова	2	0,62	590	19,0	0,008	169
	3	1,53	1750	40,4	0,017	
	10,7	3,89	590	102,6	0,033	

D<sub>1</sub> — коэффициент диффузии для водных растворов.D<sub>2</sub> — коэффициент диффузии, определенный экспериментально [19].

Выделение аммонийного азота из донных отложений

Место отбора проб	Результаты эксперимента				Расчетные данные	
	Длительность опыта, сутки	мкг N за время экспозиции	мг N/м <sup>2</sup> в сутки	% от исходного содержания		мг N/м <sup>2</sup> в сутки
				NH <sub>4</sub> в порошом растворе	N общего в иле	
5 км выше Ивановской плотины	1	5,7	11,0	3,6	0,018	29,0
Корчева	1	18,8	36,1	5,0	0,049	37,9
Шоша у Безбородова	2	2,6	5,1	8,3	0,023	17,5
	3	8,5	16,4	18,6	0,051	
	10,7	22,8	45,5	208,4	0,568	

D<sub>1</sub> — коэффициент диффузии для водных растворовD<sub>2</sub> — коэффициент диффузии, определенный экспериментально [12].

илах Рыбинского водохранилища при постановке опытов непосредственно в водоеме [16].

Интересно сопоставить результаты проведенных экспериментов с расчетной величиной концентрационной диффузии этих веществ из поровых растворов в придонный слой воды. Предполагается, что диффузия ионов из донных отложений подчиняется закону Фика, согласно которому количество растворенного вещества  $dm$ , диффундирующего за время  $dt$  через площадь сечения  $S$ , пропорционально градиенту концентрации  $dc/dx$  и зависит от коэффициента диффузии  $D$ , характеризующего природу растворенного вещества и свойства растворителя:

$$dm = -D \frac{dc}{dx} S dt$$

При расчете диффузионного переноса фосфатов и аммонийного азота (табл. 6 и 7) использованы коэффициенты диффузии ионов в водных растворах. Для двухвалентных ионов при  $10^\circ$  они составляют  $0,36-0,78 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с. ( в среднем —  $0,4 \cdot 10^{-5}$ ), для одновалентных —  $1,04-1,29 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с.; коэффициент диффузии аммиака при  $4^\circ\text{C}$  равен  $1,23 \cdot 10^{-5}$  см<sup>2</sup>/с.. [15]. При определении площади сечения вводили поправку на твердую фазу, исходя из содержания влаги, объем которой в исследуемых илах колебался от 89 до 92%, и имеющих в литературе указаний о том, что свободная интермилллярная вода составляет 60—85% от общей влажности [9, 19].

Для сравнения проведены также расчеты на основе имеющихся в литературе коэффициентов диффузии, определявшихся экспериментально [19, 12]. Дуурсма проводил определения коэффициентов при  $20^\circ\text{C}$  в тонкодисперсном песке, предварительно промытом водой, обработанном концентрированной HCl и прокипяченным с K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub>. Для PO<sub>4</sub>  $D = 2,2 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с. [19].

Величины концентрационной диффузии фосфатов, рассчитанные разными способами, оказались почти одинаковыми, но существенно отличались от результатов наших экспериментов, особенно полученных в анаэробных условиях (табл. 6).

Выделение же аммонийного азота в опыте обычно было ниже рассчитанного на основе коэффициентов диффузии для водных растворов, и только при низком содержании в придонной воде O<sub>2</sub> соответствовало расчетным величинам, а в анаэробных условиях превышало их (табл. 7), что, по-видимому, вызвано наличием верхнего окисленного слоя ила, тормозящего диффузию, и разрушением его при исчезновении O<sub>2</sub>.

Коэффициенты диффузии NH<sub>4</sub>, определенные для натурального ила с помощью диффузионной ячейки [12], вероятно, не вполне соответствуют таковым, являясь результатом не только диффузии, но и сорбционных процессов. Величина и направленность последних определяется как концентрацией растворенных веществ, так и свойствами иловых отложений, изменяющимися с изменением окислительно-восстановительных условий, которые в эксперименте были неадекватны природным. Результаты, полученные при использовании этих коэффициентов, оказались значительно ниже как величин,

рассчитанных на основе коэффициентов диффузии для водных растворов, так и экспериментальных данных (табл. 7).

Таким образом, проведенные опыты и расчеты позволяют предполагать, что обмен фосфатами и аммонийным азотом между донными отложениями и водой даже в статических условиях определяется не только концентрационной диффузией, но и зависит от других физико-химических и биотических факторов.

Для волжских водохранилищ, с их относительно малыми глубинами и большими площадями мелководий, характерно частое ветровое перемешивание водных масс, которое способствует не только аэрации, но и активному контакту донных отложений с водой. Тысячи тонн отложений переходят во взвешенное состояние, а их тонкодисперсная фракция довольно долго присутствует в воде.

С целью изучения влияния донных отложений на содержание фосфора в воде в динамических условиях выполнена серия опытов с добавкой к природной воде их тонкодисперсной фракции. Пробы отбирались из верхнего 5-см слоя отложений. Тонкодисперсная фракция, выделенная из только что отобранных проб методом отстаивания, содержала частицы диаметром не более 15 мкм. Концентрация органического вещества в этой фракции была на 22%, а общего фосфора (0,30—0,39% от сухого веса) почти в два раза выше, чем в иле, не разделенном на фракции (табл. 1). Содержание иловых частиц в суспензиях колебалось от 50 до 800 мг/л. В опытах использовалась придонная вода, отобранная одновременно с пробам ила. Анализ суспензий обычно проводился через час после их приготовления, что обеспечивало установление фосфатного равновесия между твердой и жидкой фазами.

При содержании фосфатов в исходной воде выше 35 мкг Р/л после добавки ила концентрация их в жидкой фазе (фильтрат) снижалась, несмотря на относительно высокое содержание фосфора в добавленной фракции. При меньшей концентрации фосфатов в воде имело место выделение их из иловой взвеси (табл. 8). Количество выделенных или поглощенных фосфатов находилось в пределах 1—30 мкг Р/л. Эти величины на 1—2 порядка выше, чем выделение  $\text{PO}_4$  из донных отложений в статических условиях. Последнее, как указывалось выше, составляет 0,5—0,8 мг Р/м<sup>2</sup> в сутки, или при отнесении ко всему столбу воды — примерно 0,05 мкг/л, и лишь в анаэробных условиях возрастает до десятых долей мкг Р/л.

Полученные данные свидетельствуют о способности донных отложений поддерживать концентрацию фосфатов на сравнительно постоянном уровне. Сведения о буферных свойствах донных отложений имеются в литературе [27].

Значительную часть (40—60%) фосфора взвесей в суспензиях составлял реактивный фосфор (табл. 8), представляющий собой фракцию, переходящую под воздействием реактивов в раствор и реагирующую с молибдатом. Интересна экологическая значимость этой фракции. Имеющиеся материалы позволяют предположить, что относительно низкое содержание валового фосфора в илах мелководного высокопродуктивного Шошинского плеса при высоких



**Содержание растворенного и реактивного фосфора в иловых суспензиях  
(мкг Р/л)**

Станция	Исходная вода, $PO_4$	Количество добавленной взвеси, мг/л	Суспензия	
			$PO_4$ растворенный	$PO_4$ реактивный
Иваньковское водохранилище:				
Выше плотины, VII—74	84	600	37	860
Корчева, VII—74	79	690	51	696
Корчева, VII—73	75	87	42	—
Корчева, VIII—74	70	690	61	831
Корчева, X—74	52	69	48	100
Иваньково, X—74	49	49	36	84
Корчева, VIII—74	33	820	43	—
Шоша у Безбородова, VII—74	19	880	60	860
Шоша у Безбородова, X—74	15	67	21	89
Рыбинское водохранилище:				
Противье, VI—73	22	442	47	—
Мякса, VI—73	12	558	22	—
Наволоки, VI—73	7	298	30	—

скоростях оборота фосфатов в воде [6] обусловлено непрерывным включением подвижной фракции в круговорот веществ в водной толще, препятствующим накоплению фосфора в донных отложениях (табл. 1). Литературные сведения о доступности фосфора грунтов противоречивы. По мнению Голтермана [21], фосфор иловых отложений усваивается водорослями так же, как и растворенный фосфатный; по данным Фитцджеральда [23], *Cladophora* и *Selenastrum* не могут его использовать.

О степени подвижности фосфора иловых взвесей можно судить по интенсивности обмена минерального фосфора в суспензиях. Методика определения была аналогична примененной для воды [6]. Снижение удельной активности жидкой фазы происходило по экспоненте, что давало возможность, используя графический метод, определить время и скорость оборота имеющихся в растворе фосфатов. Параллельно проводилось определение скорости оборота  $PO_4$  в воде без добавки ила.

Интенсивность фосфатного обмена в суспензиях была в 10—20 раз выше, чем в воде (табл. 9). Поскольку суспензии содержали разное количество взвесей, для сравнения полученных данных сделан пересчет скорости оборота на 1 г сырого ила. Максимальные величины характерны для илов Шошинского плеса, минимальные—

Скорость оборота минерального фосфора в иловых суспензиях и придонной воде  
Иваньковского водохранилища

Место отбора проб	Суспензия					Придонная вода		
	взвесь, мг/л	Р <sub>О<sub>4</sub></sub> , мкг Р/л	время оборо- та, час	скорость оборота		Р <sub>О<sub>4</sub></sub> , мкг Р/л	время обо- рота, час	скорость оборота, мкг Р/л в час
				мкг Р/л в час	мкг Р/г сыро- го ила в час			
5 км выше плотины, 17.V	320	68	2,9	23,4	15,0	32	17,7	1,8
Корчева, 18.V	310	56	2,4	23,3	15,0	64	31,7	2,0
Корчева, 25.VII	820	29	2,3	12,6	3,0	33	208,8	0,2
Корчева, 2.VIII	820	43	2,4	18,0	4,0	33	42,4	0,8
Шоша у Безбородова, 31.VII	430	31	0,8	39,5	17,4	49	23,7	2,1
5 км выше плотины, 11.X	49	36	8,2	4,4	15,1	49	73,1	0,7
Корчева, 12.X	69	48	8,6	5,6	14,5	52	90,7	0,6
Шоша у Безбородова, 13.X	61	21	2,5	8,4	28,0	15	6,6	2,3

для илов, находившихся до начала эксперимента в бескислородных условиях (станция Корчева).

По-видимому, обмен фосфатами в значительной мере обусловлен биотическим фактором, о чем свидетельствуют результаты опыта с иловой суспензией, фиксированной сулемой, в котором процесс поглощения был в 2 раза медленнее по сравнению с контролем. Это предположение согласуется с литературными данными [27] и подтверждается максимальной интенсивностью обмена в суспензиях илов продуктивного Шошинского плеса.

Выполненные исследования показывают, что выделение биогенных элементов из донных отложений происходит не только в результате концентрационной диффузии, но и зависит от ряда физико-химических и биотических условий. Гидродинамическая активность водных масс, обеспечивающая переход иловых частиц в воду, выступает в роли фактора, регулирующего содержание фосфатов в воде и поддерживающего их концентрацию на уровне, свойственном данной системе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Алейкин О. А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л., 1972, 269 с.
2. Ариунушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М., 1970, 487 с.
3. Бикбулатов Э. С. О методе определения общего фосфора в природных водах. — Гидрохим. матер., 1974, т. 60, с. 161—164.
4. Бруевич С. В. Некоторые методы химического исследования грунтов и грунтовых растворов моря. М. — Свердловск, 1944, 40 с.
5. Бруевич С. В., Певзник Р. М., Понизовская В. Л. и Сибирякова М. А. О влиянии донных отложений на химизм пресных водоемов. — Гидрохим. матер., 1939, т. 11, с. 131—167.
6. Былинкина А. А. Исследования оборачиваемости фосфатов в водной толще водохранилищ. — Настоящий сборник, с. 53—73.
7. Драчев С. М. Химический состав донных отложений и затопленных почв. — В кн.: Абиотические факторы биологического круговорота в водоемах. Л., 1971, с. 3—7.
8. Зиминова Н. А., Курдин В. П. Объемный вес донных отложений Рыбинского водохранилища. В кн.: Абиотические факторы биологического круговорота в водоемах. Л., 1971, с. 137—142.
9. Крюков П. А. Горные, почвенные и иловые растворы. Новосибирск, 1971, 220 с.
10. Крюков П. А., Жучкова А. А. Физико-химические явления, связанные с выделением растворов из горных пород. — В кн.: Современные представления о связанной воде в породах. М., 1963.
11. Кузнецов С. И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л., 1970, 440 с.
12. Мартынова М. В. Динамика азота в илах Можайского водохранилища. Автореф. канд. дисс. М., МГУ, 1973, 22 с.
13. Мосевич Н. А. К изучению круговорота фосфора в водоемах. — Тр. проблемных и тематических совещаний ЗИН, вып. 2. Проблемы гидробиологии внутр. вод. 2. М.-Л., 1954, с. 150—160.
14. Россолимо Л. Л. Современное состояние вопроса об обмене растворенными веществами между водой и грунтом озер и прудов. — Тр. Московского технического инст. рыбной промысл. и хозяйства им. А. И. Микояна. 1958, вып. 9, с. 3—47.
15. Справочник химика. М.-Л., 1964, т. 3, 1005 с.
16. Трифонова Н. А. Содержание и выделение соединений азота донными отложениями Рыбинского водохранилища. В кн.: Биогенные элементы и органическое вещество в водохранилищах. Рыбинск, 1974, с. 68—89.

17. Трифонова Н. А. Соединения азота в Рыбинском водохранилище. — Автореф. канд. дисс. М., МГУ, 1974, 28 с.
18. Трифонова Н. А., Калинина Л. А. Об определении общего азота в воде. — Информ. бюлл «Биол. внутр. вод», 1969, № 10, с. 64—66.
19. Шишкина О. В. Геохимия морских и океанических иловых вод. М., 1972, 228 с.
20. Golterman H. L. Influence of the mud on the chemistry of water in relation to productivity. — In: Chemical environment in the aquatic habitat. Amsterdam. 1967, p. 297—313.
21. Golterman H. L., Bakels C. C. and Jakobs-Möglin J. Availability of mud phosphates for the growth of algae. — Verh. int. Verein. theor. angew. Limnol. 1969, v. 17, p. 467—479.
22. Coto K., Komatsu T., Furukawa T. Rapid colorimetric determination of manganese in waters containing iron. — Anal. Chim. Acta. 1962, v. 27. N 4, p. 331—334.
23. Fitzgerald G. P. Aerobic lake muds for the removal of phosphorus from lake waters. — Limnol. Oceanogr. 1970, v. 15, N 4, p. 550—555.
24. Menzel D. W. and Corwin N. The measurement of total phosphorus in sea water based on the liberation of organically bound fractions by persulfate oxidation. — Limnol. a. Oceanogr., 1965, v. 10, N 2, p. 281—282.
25. Mortimer C. H. The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. — Journ. Ecology, 1941, v. 29, p. 280—329.
26. Ohle W. Johnenaustausch der Gewässersedimente. — Mem. Ist. Ital. Idrobiol. 1955, Suppl., s. 221—245.
27. Pomeroy L. R., Smith E. E. and Grant C. M. The exchange of phosphate between estuarine water and sediment. — Limnol. Oceanogr. 1965, v. 10, N 2, p. 167—172.
28. Serruya C., Edelstein M., Pollinger U., Serruya S. Lake Kinneret sediments: Nutrient composition of the pore water and water exchanges. — Limnol. Oceanogr., 1974, v. 19, N 3, p. 489—508.
29. Shapiro J. Induced rapid release and uptake of phosphate by microorganisms. — Science, 1967, v. 155, N 3767, p. 1269—1271.
30. Strickland J. D. H., Parsons T. R. A practical handbook of seawater analysis. — Bull. Fisch. Res. Bd. Can. 1968, N 167, 311 p.

*Н. А. Кудрявцева*

### **Натрий и калий в илах волжских водохранилищ**

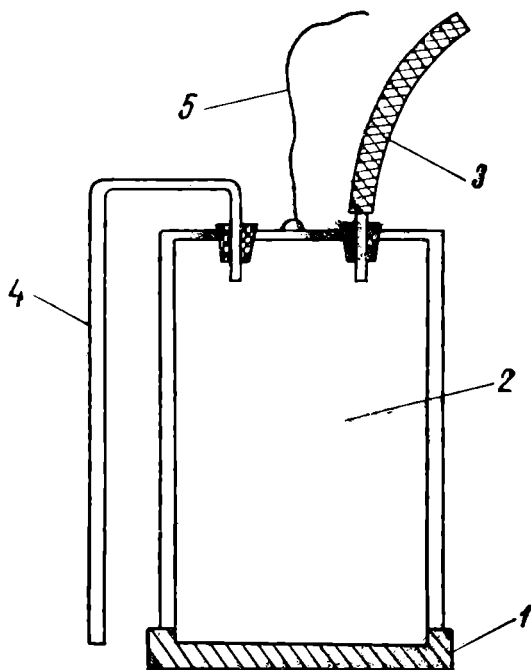
Данные о содержании валового натрия и калия в илах озер и водохранилищ Европейской части СССР малочисленны [4, 6, 9, 10, 22]. Наиболее детально изучено распределение натрия и калия в донных отложениях глубоководной части Иваньковского водохранилища [9].

Цель настоящего исследования — дать общее представление о содержании Na и K в современных отложениях водохранилищ Верхней и Средней Волги.

Отбор проб ила производился в вегетационный период 1964, 1965 и 1966 гг. В местах отбора проб глубина была не менее 7 метров. Пробы ила отбирали илососом Перфильева несколько измененной конструкции (рис. 1). При данном способе отбора извлекается одновременно верхний слой ила до 5 см и придонная взвесь. После тщательного перебалтывания часть взятой пробы отливали для определения валового калия и натрия в иле. Кроме того анализу подвергали тонкодисперсную фракцию диаметр частиц менее 15 мкм, выделенную методом отстаивания [8].

Исследуемые образцы выпаривали досуха в фарфоровых чашках на водяной бане. Сухой остаток растирали в агатовой ступке до пудрообразного состояния. Растертые образцы высушивали при  $105^{\circ}$  до постоянного веса. Потерю в весе при высушивании использовали для расчета влаги в воздушно-сухом иле. О содержании органического вещества в исследуемых образцах судили по потере при прокаливании при температуре  $450\text{--}500^{\circ}\text{C}$ .

Для определения валового натрия и калия пробы ила обрабатывались фтористоводородной кислотой, что обеспечивало выделение щелочных металлов из силикатов и алюмосиликатов [1]. После этого минеральный остаток прокаливали в муфеле и растворяли в 10% соляной кислоте. Определение натрия и калия проводилось в солянокислой вытяжке методом пламенной фотометрии. Шкала рабочих стандартных растворов готовилась с добавлением того же количества соляной кислоты, как и при обработке образцов ила.



Прибор для отбора проб ила (видоизмененный илосос Перфильева)

1 — металлический каркас; 2 — сосуд из оргстекла;  
3 — резиновый шланг; 4 — металлическая трубка;  
5 — трос

Так как во взятых пробах ила и особенно в тонкодисперсных фракциях содержалось большое количество придонной воды, то при расчете натрия и калия в них вводили поправку на содержание этих же элементов в воде. Приведенная в таблицах стандартная ошибка средней вычислялась при уровне значимости 95%.

Содержание органического вещества в иловых отложениях водохранилищ волжского каскада в среднем составляет 9,73%, в тонкодисперсных фракциях — 13,02% от сухого вещества. В расчетах средних величин не учитывали результаты анализа илов Верхневолжского водохранилища. В озерах, образующих это водохранилище, донные отложения представлены мощным слоем сапропеля. Органическое вещество в них составляло в среднем 23,6%, а в отдельных образцах достигало 36,7%. В этих озерах процентное содержание органического вещества в исходной пробе и выделенной из нее тонкодисперсной фракции ила одинаково. По-видимому, в донных отложениях преобладала фракция с диаметром частиц 15 мкм и менее.

При расчете средней величины органического вещества для илов Рыбинского водохранилища не учитывались данные Шекснинского плеса, в донных отложениях которого органическое вещество в среднем из 12 определений составляло  $28,6 \pm 2,4\%$ , что в два раза выше, по сравнению с Волжским плесом этого водохранилища. Повышенное содержание органического вещества в иловых отложениях Моложского и Шекснинского плесов было определено также В. П. Курдиным и Н. А. Зиминой [20]. Необычайно низкое содержание органического вещества найдено в донных отложениях Белого озера, являющегося истоком р. Шексны. В этом озере потеря при прокаливании в среднем из 6 проб составляла  $3,9 \pm 0,08\%$  от сухого вещества.

Во всех исследованных образцах в тонкодисперсной фракции органического вещества было больше, чем в исходной пробе ила (табл. 1). Однако статистически достоверное различие установлено только для Ивановского водохранилища. Следует отметить, хотя и незначительное, но довольно стабильное снижение органического вещества в тонкой фракции ила вниз по течению реки. Более наглядно эта тенденция прослеживается по величине отношения, рассчитанной по формуле:

$$C = \frac{a - b}{b} \cdot 100,$$

Таблица 1

Потеря при прокаливании иловых отложений волжских водохранилищ  
(% от сухого вещества)

Водохранилище	Число проб	Ил	Число проб	Тонкодисперсная фракция
Верхневолжское	6	$23,60 \pm 2,60$	6	$23,90 \pm 2,70$
Ивановское	5	$8,70 \pm 2,57$	8	$15,33 \pm 2,77$
Угличское	8	$8,96 \pm 1,49$	9	$12,73 \pm 2,43$
Рыбинское (Центральный и Волжский плесы)	10	$11,40 \pm 3,0$	18	$15,02 \pm 1,84$
Горьковское	14	$11,41 \pm 1,13$	14	$13,95 \pm 1,64$
Куйбышевское	7	$8,06 \pm 0,63$	5	$8,20 \pm 0,78$

где С — прибавка органического вещества за счет тонкодисперсной фракции, в %, а — содержание органического вещества в тонкодисперсной фракции ила, в — содержание органического вещества в пробе ила. В Ивановском водохранилище эта прибавка составила 77%, в Угличском — 42, в Рыбинском — 31 и Горьковском — 22%. В Куйбышевском водохранилище потеря при прокаливании в тонкодисперсной фракции и в пробе ила практически одинакова. Различие в содержании органического вещества в исследуемой фракции ила Ивановского и Куйбышевского водохранилищ статистически достоверно.

Иловые отложения обследованных водохранилищ характеризуются сравнительно стабильным содержанием валового натрия (табл. 2). В среднем в исходной пробе ила натрий составляет 0,75%, в тонкодисперсной фракции — 0,88% от прокаленного остатка. Более высокое содержание натрия в тонкой фракции ила, чем в иле в целом, статистически достоверно для Верхневолжского и Ивановского водохранилищ. Содержание натрия в тонкодисперсной фракции илов постепенно снижается вниз по каскаду, в Куйбышевском водохранилище оно минимально. Различие в содержании натрия в тонкой фракции ила Ивановского и Куйбышевского водохранилищ статистически достоверно (табл. 2).

Таблица 2

**Содержание натрия и калия в илах волжских водохранилищ  
(% от прокаленного остатка)**

Водохранилище	Ил		Тонкодисперсная фракция	
	натрий	калий	натрий	калий
Верхневолжское	0,74±0,04	2,28±0,12	0,85±0,03	2,49±0,09
Иваньковское	0,72±0,03	2,04±0,13	1,09±0,18	2,65±0,21
Угличское	0,76±0,14	2,11±0,11	1,04±0,23	2,43±0,23
Рыбинское (Центральный и Волжский плесы)	0,77±0,06	1,97±0,17	0,83±0,19	2,18±0,19
Горьковское	0,78±0,05	1,81±0,17	0,79±0,10	2,05±0,10
Куйбышевское	0,70±0,10	1,91±0,17	0,72±0,08	2,08±0,13

Валовой калий в иловых отложениях волжских водохранилищ составляет в среднем 2,07%, в тонкодисперсной фракции — 2,31% от прокаленного остатка. Повышение содержания калия в тонкой фракции, так же как и натрия, достоверно только для Ивановского водохранилища. Незначительная тенденция к понижению содержания калия в этой фракции отмечена вниз по каскаду. Причем различие достоверно лишь для Ивановского и Куйбышевского водохранилищ. Таким образом, донные отложения Ивановского водохранилища характеризуются максимальными концентрациями щелочных металлов.

В илах Шекснинского плеса Рыбинского водохранилища содержание натрия ( $0,66 \pm 0,07\%$  от прокаленного остатка) практически не отличается от концентрации этого элемента в донных отложениях обследованных водохранилищ, в то время как содержание калия ( $0,88 \pm 0,03\%$ ) в них было значительно ниже. Аналогичные количества калия были определены С. М. Драчевым [7] и в илах нижней части Шекснинского плеса. По мнению автора, это обусловлено особенностями четвертичных отложений и почвенного покрова площади водосбора. Однако, основной причиной обеднения калием торфянистых илов Шекснинского плеса, по-видимому, является легкость извлечения этого элемента из отмерших растительных остатков [10].

Для иловых отложений Белого озера характерно высокое содержание натрия —  $1,20 \pm 0,06\%$  и относительно низкое содержание калия —  $1,36 \pm 0,09\%$  от прокаленного остатка.

Отношение натрия к калию в донных отложениях водохранилищ выражено довольно близкими величинами и в среднем на порядок выше, чем для воды (табл. 3). Исключение составляют илы Шекснинского плеса Рыбинского водохранилища и Белого озера, в которых отношение Na : K в среднем равно 0,82.

Т а б л и ц а 3

Отношение натрия к калию в воде и илах

Водохранилище	Вода	Ил	Тонкодисперсная фракция илов
Верхневолжское	2,11	0,32	0,34
Иваньковское	4,05	0,35	0,41
Угличское	3,38	0,36	0,43
Рыбинское (Центральный и Волжский плесы)	3,04	0,39	0,38
Горьковское	3,07	0,43	0,39
Куйбышевское	2,76	0,36	0,34
Среднее	3,07	0,37	0,38

Факторы формирования донных отложений водохранилищ Верхневолжского каскада и баланс взвешенных веществ в этих водоемах детально изучены Н. А. Зиминовой и В. П. Курдиным [12, 13, 14]. Как показали их исследования, в балансе взвешенных веществ водохранилищ Верхней Волги ведущую роль играет автохтонная взвесь, образующаяся в водоеме в результате размыва берегов, дна и мелководий (58—80% от суммы прихода) и сток речных наносов (17—39% от суммы прихода). Продукция фитопланктона и высшей водной растительности дает от 2 до 5%. В этой статье баланса авторами были использованы данные только по продукции органического вещества. С учетом минерального остатка фитопланктона и высшей водной растительности доля биотического фактора в при-



ходной части баланса несколько возрастает и в наиболее продуктивном Ивановском водохранилище будет составлять, по нашим расчетам, около 8,5%.

По мнению авторов, после 60-х годов интенсивность переформирования берегов, дна и мелководий уменьшилась в три раза. В результате чего, на фоне общего снижения темпов осадконакопления, возросла роль стока взвешенных наносов реки и продукции фитопланктона, как факторов, определяющих состав и свойства иловых отложений.

Терригенная взвесь, поступающая в водоем, формируется за счет размыва почвенного покрова и подстилающих пород площади водосбора. На состав и свойства иловых отложений Рыбинского водохранилища большое влияние оказал размыв затопленных торфяников.

В северной части волжского бассейна преобладают дерновоподзолистые почвы. Почвообразующими породами служат покровные пылеватые суглинки, опесчаненные моренные суглинки, древнеалювиальные пески. В бассейне Рыбинского водохранилища дерновоподзолистые почвы сочетаются с заболоченными дерново-подзолисто-глеевыми и болотными. Таков же характер почв и в районе Горьковского водохранилища [2, 3].

На большей части бассейна Верхней и Средней Волги материнские породы представлены песчано-глинистыми отложениями, покрытыми сверху мощным чехлом ледниковых отложений. Ледниковые отложения в виде валунных суглинков чередуются со слоями межморенных песков.

Содержание щелочных металлов в почвах и подпочвенных породах колеблется в широких пределах (табл. 4).

Таблица 4

**Содержание натрия и калия в литосфере, почвах и иловых отложениях  
(в % на сухое вещество при 105°)**

Исследуемые объекты	Na	K	Источник
Литосфера	2,75	2,58	15
Почвы СССР	1,07	1,66	16
Подзолистые почвы	1,02	1,81	"
Серые лесные почвы	0,80	1,62	"
Подпочвенные породы			
суглинки	0,96	2,20	23
супеси	0,44	0,79	23
глинистые пески	0,36	0,62	"
Иловые отложения волжских водохранилищ	0,66	1,70	Наши данные

Большая подвижность натрия в сравнении с калием (потенциал ионизации натрия — 5,12, калия — 4,32) способствует вымыванию его из осадочных образований. В результате чего калий в продуктах выветривания накапливается [21]. О степени подвижности щелочных металлов в почвах можно получить некоторое представление, если сопоставить валовое содержание этих элементов в почвах с концентрацией их в водной вытяжке. По данным С. А. Кудрина [17], для почв равнинной части СССР это отношение будет следующим:

	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Сумма, %
Валовое содержание (2)	30,0	15,	21,4	33,1	100
Содержание в водной вытяжке (1)	60,6	12,0	18,0	9,4	100
Отношение 2:1	1:2	1:0,8	1:0,9	1:0,3	

Как видно, натрий в почвах в 3 раза подвижнее, чем калий. Это, очевидно, является одной из причин более низкого содержания натрия в иловых отложениях.

Исследования на Клязьминском водохранилище показали, что в свежевывапавшей взвеси натрия и калия содержалось почти в три раза меньше, чем в донных отложениях [7], в то время как органического вещества во взвеси в 2,5 раза больше. Это, вероятно, обусловлено биотическим происхождением анализируемой взвеси. На основании полученных нами данных было установлено, что в фитопланктоне в период развития синезеленых водорослей (в основном *Aphanizomenon flos-aquae*) натрий составлял 0,41 и калий 1,13% на сухое вещество (среднее из 8 определений), в период развития диатомовых водорослей (в основном *Melosira granulata* и *M. italica*) натрия содержалось 0,70 и калия 2,45% на сухое вещество (среднее из 16 определений). В прибрежно-водных растениях Ивановского и Горьковского водохранилищ содержание натрия колебалось от 0,05 до 1,36%, калия от 1,1 до 4,0% на сухое вещество [5, 18]. При отмирании фитопланктона и высшей водной растительности значительная часть щелочных катионов переходит в воду. По нашим данным, из сухой растительной массы извлекается в среднем калия — 79,2%, натрия — 77,9% от валового содержания элементов. Следовательно, минеральный остаток фитопланктона и высшей водной растительности, обедненный щелочами является незначительным источником этих элементов в донных отложениях.

Как было отмечено выше, исследуемые образцы донных отложений отбирались в глубоководных участках водохранилищ и были представлены в основном серыми и песчанистыми илами. Однотипность илов, в значительной мере определяла стабильность содержания натрия и калия в верхнем слое иловых отложений обследованных водохранилищ.

Отмеченная выше тенденция снижения содержания органическо-

го вещества и щелочных металлов в тонкодисперсной фракции ила вниз по каскаду реки, по-видимому, может быть обусловлена возрастанием роли материнских пород в образовании донных отложений. Подтверждением этому могут служить данные Н. А. Зиминвой и В. П. Курдина [12, 13, 14] о преобладающей роли автохтонной терригенной взвеси в формировании иловых отложений особенно в первое десятилетие существования водохранилищ. В последующие годы возрастает роль аллохтонной терригенной взвеси, приносимой в водоем с речным стоком. О «разбавляющей» роли кварцевого материала свидетельствует также установленная С. М. Драчевым [8] тенденция к повышению содержания кремния в тонкодисперсной фракции ила по длине Волжского каскада.

Как было отмечено выше, тонкодисперсная фракция ила Ивановского водохранилища характеризуется максимальными концентрациями натрия. Относительно высокое содержание натрия обнаружено нами и в воде этого водоема. В воде Ивановского водохранилища натрий составляет 23,8%-экв от суммы катионов, в то время как в других водохранилищах Верхневолжского каскада натрий составляет в среднем 6,5%-экв [19]. В Ивановском водохранилище установлена достоверная корреляционная связь ( $P=0,95$ ) между содержанием натрия в воде и в тонкодисперсной фракции. Это позволяет предположить, что при резком увеличении содержания натрия в воде может произойти обмен поглощенных оснований тонкодисперсных частиц ила на натрий.

### Выводы

1. Донные отложения глубоководной части волжских водохранилищ (серые и песчанистые илы) характеризуются довольно стабильным содержанием валового натрия и калия ( $0,75 \pm 0,02\%$  и  $2,01 \pm 0,15\%$  от прокаленного остатка соответственно). Повышенное содержание щелочных металлов свойственно тонкодисперсной фракции ила. Для указанной фракции отмечена слабовыраженная тенденция к снижению натрия и калия вниз по каскаду водохранилищ.

Торфянистые илы (Шекснинский плес Рыбинского водохранилища) с высоким содержанием органического вещества отличаются низким содержанием калия ( $0,88 \pm 0,22\%$  от прокаленного остатка).

2. Отношение натрия к калию в илах исследованных водохранилищ весьма устойчиво и в среднем на порядок ниже, чем в воде.

Для Ивановского водохранилища установлена достоверная корреляционная связь между содержанием натрия в воде и в тонкодисперсной фракции ила.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Аринушкина Е. В. Руководство по химическому анализу почв. М., с. 487.
2. Атлас Ярославской области. М., 1964, с. 28.
3. Велikanов Д. А. Почвенный покров и почвенные районы Ярославской области. Уч. Зап. Яросл. гос. пед. инст. 1958, вып. XX(XXX), с. 97—102.
4. Гильзен К. К. и Гинзбург И. И. Исследование грунтов Онежского озера. Тр. Минералог. музея АН СССР, 1930, т. IV, с. 197—220.

5. **Довбня И. В.** Содержание зольных элементов в прибрежно-водных растениях Горьковского водохранилища. Информ. бюлл. «Биол. внутр. вод», 1972, № 15, с. 13—16.
6. **Домрачев П. Ф.** Гидрологический очерк о. Ильмень. В кн.: Материалы по исследованию р. Волхов и его бассейна. 1926, с. 344—420.
7. **Драчев С. М.** Химический состав донных отложений и затопленных почв. В кн.: Абиотические факторы биологического круговорота в водоемах. Л., 1971, с. 3—7.
8. **Драчев С. М.** Кремний в тонкодисперсной части донных отложений и составе водохранилищ Верхней Волги. В кн.: Биогенные элементы и органическое вещество в водохранилищах. Рыбинск, 1974, с. 90—102.
9. **Драчев С. М., Кудрявцева Н. А.** О химическом составе донных отложений Иваньковского водохранилища. В кн.: Биогенные элементы и органическое вещество в водохранилищах. Рыбинск, 1974, с. 102—110.
10. **Жуков М. С.** О формах соединения К и Са в растениях. Химизация социалистического земледелия. 1940, № 11—12, с. 62—65.
11. **Закуленков Л. Д.** Озера Калининской области. В кн.: Природа и хозяйство Калининской области. Калинин, 1960, с. 198—247.
12. **Зиминова Н. А. и В. П. Курдин.** Баланс взвешенных веществ в Угличском водохранилище. В кн.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Л., 1972, с. 211—225.
13. **Зиминова Н. А. и Курдин В. П.** Баланс взвешенных веществ в Рыбинском водохранилище. В кн.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Л., 1972, с. 199—210.
14. **Зиминова Н. А. и Курдин В. П.** Баланс взвешенных веществ в Иваньковском водохранилище. В кн.: Факторы формирования водных масс и районирование внутренних водоемов. Л., 1974, с. 89—94.
15. **Кларк Ф. У.** Данные по геохимии. 1924.
16. **Курдин С. А.** О среднем химическом элементарном составе почв. Почвоведение. 1949, № 9, с. 505—617.
17. **Курдин С. А.** Средний состав воднорастворимых соединений в некоторых почвах Европейской части СССР. Почвоведение, 1966, № 5, с. 88—95.
18. **Кудрявцева Н. А.** О содержании золы и зольных элементов в некоторых видах рдестов и горце земноводном. Материалы к совещанию по прогнозированию содержания биогенных элементов и органического вещества в водохранилищах. Рыбинск, 1969, с. 62—68.
19. **Кудрявцева Н. А.** Влияние бытовых и промышленных стоков на солевой состав вод Верхней Волги от истоков до Иваньковской плотины. В кн.: Абиотические факторы биологического круговорота в водоемах. Л., 1971, с. 43—51.
20. **Курдин В. П. и Зиминова Н. А.** Изменение количества органического вещества в илистых отложениях Рыбинского водохранилища. В кн.: Биологические и гидрологические факторы местных перемещений рыб в водохранилищах. Л., 1968, с. 87—91.
21. **Полынов Б. Б.** Состав континентальных отложений. Изб. труды. М., 1956, с. 256—284.
22. **Семенович Н. И.** Донные отложения Ладожского озера. М.-Л., 1966, с. 104.
23. **Сибирцев Н. М.** Почвоведение. Изб. соч., т. 2, М., 1951, с. 472.

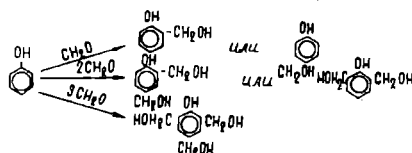
*В. Е. Синельников, В. К. Шитиков*

### **Исследование продуктов конденсации органических веществ, образующихся в водоемах с участием фенола**

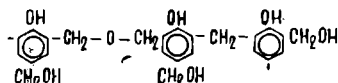
Имеется ряд косвенных сведений о том, что при взаимодействии некоторых реакционноспособных органических соединений между собой вне организмов образуются новые вещества [4, 9]. Реакции синтеза начинаются еще на очистных сооружениях и продолжают в водоёме [14, 15].

Известно, что некоторые процессы, происходящие в природе, например в земной коре и гидросфере, можно моделировать в лабораторных условиях. Однако, эти модельные синтезы проводили при высоких давлениях и температурах [4, 6, 16]. Цель нашего исследования состояла в том, чтобы в природных условиях изучить возможность протекания процессов конденсации фенола с формальдегидом. Для этого нами были разработаны некоторые методические приемы качественной и количественной оценки процессов их конденсации, протекающих в водоеме или в лабораторных опытах, отдельные параметры которых максимально приближались к условиям водоема. В этих условиях могут протекать химические реакции, скорости которых в  $10^3$ — $10^6$  раз ниже, чем скорости обычно изучаемых химических реакций.

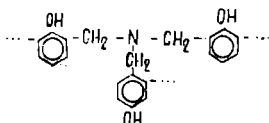
Благодаря процессам окисления многих природных и промышленных органических соединений, поступающих в водоемы с городскими сточными водами, возможно образование фенолов и альдегидов различного строения [11]. В качестве одного из альдегидов нами был выбран формальдегид. Схему конденсации фенола с формальдегидом можно представить следующим образом:



Оксибензиловые спирты и ди- и триметилфенолы устойчивы преимущественно в щелочных средах и при низких температурах. В нейтральных и тем более в кислых средах такие соединения легко вступают в поликонденсацию между собой или с фенолом с образованием олигомеров фенолформальдегидного типа, строение которых в общем виде можно представить следующим образом:



В присутствии избытка аммиака по реакции Манниха [17] возможно образование вторичных или третичных аминогрупп в молекуле олигомера:



Исследование процессов конденсации фенола с формальдегидом осуществили:

1. В лабораторных условиях (исключающих участие биологических факторов) при pH 8,0, температуре 18—20° и концентрациях реагирующих веществ, близких к концентрациям на участках выбросов сточных вод в водоемы.

2. В экспериментальных аквариумах лаборатории биологии низших организмов ИБВВ АН СССР, в которых сформировалась экосистема, состоящая из фенолразрушающих микроорганизмов, простейших, водорослей и высших растений [2]. С целью создания благоприятных условий для протекания фотосинтеза водорослей аквариумы находились при постоянной освещенности 1500—3000 люкс. В аквариумы на протяжении 1,5 лет ежедневно вносили по 5 мг/л фенола.

3. В водоемах, в воде которых содержались фенол, формальдегид, аммиак и растворимые продукты их конденсации. Последние в результате взаимодействия между собой осаждались на дно и там концентрировались.

### **Исследование процессов конденсации фенола с формальдегидом в лабораторных условиях**

Цель этой серии опытов состояла в том, чтобы получить продукты конденсации, выделить и исследовать их свойства.

В первой серии опытов исследовали возможность образования продуктов конденсации при концентрациях фенола и формальдегида, близких к концентрациям у мест выпусков сточных вод.

Конденсацию фенола с формальдегидом осуществляли в круглодонной колбе емкостью 350 мл, снабженной обратным холодильником и термометром. В колбу наливали 200 мл водопроводной воды и прибавляли фенол (0,01—1,0 мМ) и формальдегид (0,04—4,0 мМ). Формальдегид был взят в виде водного раствора формалина с концентрацией 32,5 весовых %. После перемешивания реакционной смеси в течение 3—5 минут определяли рН среды по индикаторной бумажке, содержание фенола бромометрически по Коппешауру [3] или при малых его концентрациях — пирамидоновым методом [3] и содержание формальдегида — сульфидным способом [3], а при малых его концентрациях — с помощью фенил-гидразина [8]. В реакционную смесь добавляли водный раствор аммиака до значений рН, близких к 8,0. После того поликонденсацию фенола с формальдегидом осуществляли при комнатной температуре (18—20°) в течение 144 часов (6 суток). Через определенные промежутки времени (4—5 часов) определяли рН воды, содержание фенола и формальдегида. После шести дней опыта концентрации фенола и формальдегида уменьшились по сравнению с исходными, при этом реакционные растворы начинали слегка опалесцировать, что по-видимому, связано с образованием нерастворимых в воде взвешенных частиц. Поэтому для их осаждения при повторном проведении опытов в реакционные водные растворы вносили 0,5—1,0 г сухой тонкорастертой глины, которая предварительно была освобождена от остатков органических веществ путем прокаливании в муфельной печи в течение 2-х часов при 400°. Поскольку в водоемах всегда содержится взвесь мелкодисперсной глины и других почвенных частиц, внесение взвеси не противоречило поставленной задаче.

После полного осаждения мелкодисперсных частиц (через 30—

45 мин) определяли концентрации  $C_6H_5OH$  и  $CH_2O$ , а так же pH раствора. При проведении синтеза в присутствии глины исходные концентрации фенола (0,01—0,1 мМ/л) и формальдегида (0,04—0,4 мМ/л) уменьшались быстрее, чем в ее отсутствие. Для поддержания постоянных исходных концентраций (табл. 1) периодически добавляли фенол, формальдегид и аммиак. Поэтому суммарное количество исходных соединений в конце опыта было в 40—50 раз выше, чем первоначально взятые количества.

Однако, при проведении поликонденсации при более высоких концентрациях фенола (1,0 мМ/л) и формальдегида (4,0 мМ/л) суммарное количество каждого из них, внесенное в течение всего опыта, было выше первоначального количества только в 3 раза.

Полученный в процессе опыта осадок, представляющий собой мелкодисперсную смесь твердых частиц глины и смолообразных продуктов реакции, отделяли от водного слоя путем декантации и фильтровали через стеклянный фильтр с последующей обработкой ацетоном. Смолообразный продукт, полученный после испарения ацетона, высушивали до постоянного веса при комнатной температуре в вакуум-эксикаторе. Он растворялся в ацетоне, хлороформе, этаноле, имел молекулярную массу 150—400 (определена эбулиоскопически в хлороформе) и содержал 24,3% гидроксильных групп и 10,8% метилольных групп. При длительном хранении на воздухе (более месяца), а так же при нагревании до 150° смолообразный продукт переходил в неплавкое и нерастворимое состояние (отверждался). Отверждение, по-видимому, обусловлено присутствием в молекуле олигомера метилольных ( $-CH_2OH$ ) групп [10].

Отверждение при нагревании проводили в металлическом круглом блоке диаметром 300 мм и толщиной 40 мм. Блок имеет 4 гнезда для металлических стаканчиков размером 35 мм в диаметре и глубиной 25 мм, а также центральное гнездо для термометра, залитое сплавом Вуда.

Навеску исследуемого вещества (1,0—2,0 г) помещали в металлический стаканчик, который устанавливался в блок, нагретый до 150°. Вещество сначала расплавлялось и растекалось по дну стаканчика. В процессе термообработки его периодически перемешивали и наблюдали за изменением вязкости реакционной массы. Как только полимер превращался в твердую хрупкую массу, отмечали время отверждения, а затем проверяли его растворимость в органических растворителях. Содержание низкомолекулярных веществ в отвержденном продукте определяли путем экстракции их ацетоном (в круглодонной колбе с обратным холодильником при кипении ацетона в течение 3-х часов).

Продукт после экстракции отфильтровывали на стеклянный фильтр и сушили до постоянного веса. По убыли массы определяли количество низкомолекулярных веществ, растворимых в ацетоне. При продолжительности отверждения 45—50 мин, потеря в массе составляла 46,4—49,3% от первоначального веса образца (табл. 3).

Вторая серия опытов по получению продуктов конденсации была проведена в тех же условиях, но при больших концентрациях фено-

Таблица 1

## Условия получения олигомеров фенолформальдегидного типа в воде при малых концентрациях исходных веществ

№№ опытов	Максимальные количества исходных веществ в воде, мМ			Суммарное количество исходных веществ, мМ			Выход продукта реакции, %		Примечание
	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	CH <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	CH <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>	к сумме C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH и CH <sub>2</sub> O	тоже с учетом NH <sub>3</sub>	
1	0,01	0,04	0,06—0,12	0,5	2,0	6,0	21,0	6,5	Продукт желтого цвета, вязкотекучий, флуоресцирует
2	0,1	0,4	0,06—0,12	4,0	16,0	3,0	12,0	11,3	То же
3	1,0	4,0	0,3—1,2	3,0	12,0	3,0	12,3	11,6	То же

Таблица 2

## Условия получения олигомеров фенолформальдегидного типа в воде при больших концентрациях исходных веществ

№№ опытов	Исходные соединения, М			Молекулярные соотношения C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH:CH <sub>2</sub> O	Температура реакции С°	Выход продукта реакции		Примечание
	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	CH <sub>2</sub> O	NH <sub>3</sub>			к сумме C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH и CH <sub>2</sub> O	тоже с учетом NH <sub>3</sub>	
1	0,5	0,25	0,18	2:1	18—20	33,9	32,2	смолообразный продукт
3	0,1	0,05	0,07	2:1	18—20	5,5	5,0	такой же
4	0,5	0,5	0,10	1:1	18—20	14,0	13,6	вязкотекучий
5	0,5	1,0	0,11	1:2	18—20	15,7	15,3	вязкотекучий
6	0,5	1,0	0,90	1:2	17—32	43,9	36,6	твердый
7	0,25	1,0	0,42	1:4	17—30	23,1	23,0	смолообразный



**Физико-химическая характеристика фенолформальдегидных олигомеров,  
синтезированных при больших и малых количествах реагирующих веществ**

№№ опытов	Содержание воды, %	Гидроксильные группы, %	Метильные группы, %	Элементный состав, %				Отверждение при 150°		
				C	H	N	O	продолжи-тельность, мин.	Потеря массы, %	Количество низкомолекулярных веществ, %
Синтез при малых количествах реагирующих веществ										
1	0,24	24,3	10,8	62,9	8,3	5,6	23,2	50	49,3	45,9
2	0,31	25,7	10,1	42,2*	7,8	7,1	27,3	45	46,4	51,3
Синтез при больших количествах реагирующих веществ										
1	0,79	22,7	13,8	69,2	7,7	5,8	17,3	35	39,7	40,4
4	0,27	22,5	21,4	68,8	6,7	3,4	22,1	40	47,7	44,2
5	0,61	21,4	31,3	71,7	6,9	2,2	19,8	30	31,8	42,2
6	0,33	18,7	11,9	68,7	6,8	10,2	14,3	30	13,0	20,7
7	0,59	18,4	16,4	68,3	7,2	8,3	16,2	35	41,1	43,6

\* Минеральная взвесь от общей массы составила 15,6%.

ла (0,1—0,5 М/л) и формальдегида (0,05—1,0 М/л) (табл. 2). После полного растворения фенола в реакционную колбу прибавляли формальдегид. При молярном соотношении фенола к формальдегиду 1 : 4 наблюдалось сильное помутнение и разогревание реакционного раствора. Для уменьшения влияния теплового эффекта на процесс конденсации аммиак прибавляли порциями по 0,5 мл через каждые 5—10 мин при непрерывном перемешивании до тех пор, пока рН среды не устанавливался близким к 8,0. Глину не добавляли, т. к. при высоких исходных концентрациях фенола и формальдегида через 48 часов образовывались 2 видимых слоя (водный и смолообразный). Воду сливали путем декантации. Вязкотекучий или смолообразный продукт промывали дистиллированной водой до отсутствия качественной реакции на фенол. Для удаления воды его обрабатывали этанолом и сушили до постоянного веса при комнатной температуре в течение 3—4 суток в вакуум-эксикаторе. После высушивания были получены вязкотекучие (молярное соотношение фенол: формальдегид=4:1 или 2:1) или твердые (молярное соотношение фенол: формальдегид=1:2) продукты. Выход продуктов реакции составлял от 5,0 до 36,6%, что в целом выше, чем в предыдущих опытах при малых концентрациях реагирующих веществ. В полученном продукте содержание гидроксильных групп составляло 18,4—22,7%, а метилольных — 11,9—31,3%. Длительность отверждения составляла 35—40 минут (табл. 3). Таким образом, при малых и больших концентрациях фенола и формальдегида в воде образуются олигомеры фенол-формальдегидного типа, свойства которых меняются в зависимости от соотношения исходных реагирующих веществ.

### Синтез с участием биологических факторов

Опыты проводились в течение полутора лет в девяти аквариумах с природной водой объемом 4 и 9 литров при температуре 18—23° и при рН равным 6,6—6,8. На дно каждого аквариума перед началом опыта помещали 1,0 кг промытого и прокаленного песка, высаживали 10,0 г (сырой вес) элодеи и запускали по 10 особей моллюсков. В опытах использовали воду из пруда пос. Борок, в которой содержалось большое количество гидробионтов. За время опытов в каждый аквариум было внесено по 3,2 г фенола (порциями по 5 мг/л) ежедневно. Превращения фенола происходили при дефиците  $O_2$  (3—20% насыщения) и биогенных элементов (Р и N). В условиях опыта образовывались растворимые в воде окрашенные промежуточные продукты, присутствие которых регистрировалось по увеличению цветности воды,  $H_2O_2$  и другие перекисные соединения, возникающие в результате окисления фенола оксидазами [1] (табл. 4).

На дне аквариумов в конце опытов образовался слой буро-коричневого ила, высотой 1,0—2,0 см. Весь ил собирали с помощью биологической пипетки, которую погружали вертикально в аквариум настолько, чтобы не затрагивать нижележащий слой песка. Ил,

освобожденный от воды фильтрованием, высушивали в чашке Петри при комнатной температуре. Сухой остаток растирали в ступке до мелкодисперсного состояния. Экстракцией при комнатной температуре из него выделяли вещества, растворимые в хлороформе. Выход хлороформрастворимых веществ составил 13,1% от общего количества внесенного фенола (6,12 г на 9 л воды). Количество хлороформрастворимых веществ, содержащееся в донных отложениях аквариумов, составило 300 мг/г сухого ила, что на порядок больше, чем в иле рек [10].

Таблица 4

**Концентрации перекиси водорода и перекисных соединений  
в аквариумах с фенолом**

Аквариумы №№	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>		Сумма перекисных соединений, мкг-экв/л
	мкг/л	мкг-экв л	
Контроль	20,0	0,6	0,6
1	202,8	6,3	18,0
2	210,6	6,5	13,2
3	214,5	6,7	13,3
4	206,7	6,5	12,9
5	183,3	5,7	7,2

Показана принципиальная возможность разделения на пластинках Silufol UV<sub>254</sub> хлороформрастворимых веществ в смеси растворителей: метанол:бутанол:уксусная кислота (8:45:4) (табл. 5).

Таблица 5

**Коэффициенты распределения отдельных фракций  
хлороформрастворимых веществ на Silufol UV<sub>254</sub>**

№№ аквариумов	Время раз- деления, мин	Коэффициенты распределения фракций (Rf)			
		1	2	3	4

**Хлороформрастворимые вещества из аквариумов**

1	5	0,58	0,68	0,76	0,86
2	5	0,59	0,69	0,75	0,86
3	5	0,58	0,69	0,75	0,86
4	5	0,58	0,69	0,76	0,88

**Продукты конденсации фенола с формальдегидом**

1*	5	0,57	—	—	0,88
2*	5	0,58	—	—	0,86

\* Номера опытов соответствуют №№ опытов, приведенных в табл. 3.

Из хлороформрастворимых веществ были выделены 4 фракции с  $R_f$  1) 0,58—0,59; 2) 0,68—0,69; 3) 0,75—0,76; 4) 0,86—0,88. При этом обнаружены продукты конденсации фенолов с альдегидами (ПКФ) (фракция 1). Олигомеры фенолформальдегидного типа имели  $R_f$  0,57—0,58, а содержащаяся в них низкомолекулярная примесь — 0,86—0,88 (фракция 4). Кроме того, были обнаружены низкомолекулярные производные ароматических соединений (фракция 2), идентифицированные качественными реакциями как производные кумаринов и липиды. Зеленые и желтые пигменты, образующиеся, как правило, из остатков водорослей, были обнаружены во фракции 3 и 4 по характерным цветам флуоресценции (табл. 6). Цвет флуоресценции регистрировался с помощью осветителя КП-1Н. Окрашенность при дневном свете и цвет флуоресценции фракции 1 оказался близким по цветовым оттенкам к продуктам конденсации фенола (см. табл. 1).

Препаративное разделение хлороформрастворимых веществ было осуществлено на колонке с окисью алюминия активностью 1 по Брокману. Длина колонки 22 см, диаметр 7 см. Для отделения ПКФ фракции хлороформрастворимых веществ, окрашенной в желтокоричневые тона, от «пигментной» части, окрашенной в зеленые и бледножелтые тона, в качестве растворителя использовали хлороформ. Выход ПКФ фракции составил 1,7% от общего количества внесенного фенола. ПКФ растворялись в хлороформе, четыреххлористом углеороде, ацетоне, уксусной кислоте и частично в этаноле.

В инфракрасных спектрах ПКФ фракции имеется широкая полоса поглощения в области  $3500\text{ см}^{-1}$ , характерная для гидроксильной группы, и интенсивные полосы поглощения в области  $2850$  и  $2950\text{ см}^{-1}$ , характерные для метильных и метиленовых групп. Полоса поглощения в области  $1750\text{ см}^{-1}$  обусловлена колебаниями карбонильной группы в кислотной и сложноэфирной группировках (рис. 1).

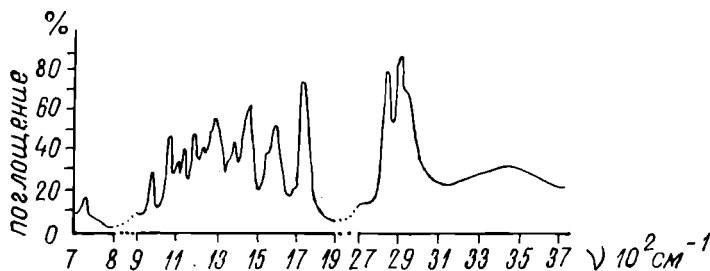


Рис. 1. ИК — спектр смолы, выделенной из донных отложений аквариума, содержащего продукты распада фенола

В продуктах конденсации содержится 19,4% гидроксильных групп. Метилольные группы отсутствовали. Продукты конденсации не отверждались при  $t^\circ 150\text{—}250^\circ$  в течение одного часа. Элемент-

**Окрашенность при дневном свете и цвет флуоресценции отдельных фракций хлорформрастворимых веществ**

№ фракций	Разделение на силуфол		Разделение на незакрепленном слое окиси алюминия		Продукты
	Окрашенность	Цвет флуоресценции	Окрашенность	Цвет флуоресценции	
1	Желтая, коричневая	Бледножелтый, бледнооранжевый	Бледножелтый, коричневый	Бледножелтый	По-видимому продукты конденсации фенола.
2	Бесцветный	Светлозеленый, голубой	Бесцветный	Зеленоголубой, белый	Липиды, низкомолекулярные производные ароматических соединений (производные кумаринов).
3	Желтый, темный	Яркожелтый с красноватым оттенком	Желтый	Яркожелтый	Желтые растительные пигменты
4	Зеленый	Красный	Бледнокоричневый	Темнокрасный	Хлорофилл
Продукты конденсации фенола с формальдегидом					
1	Желтый	Желтый	Бледножелтый,	Желтый	Олигомеры фенолформальдегидного типа.
2	Желтый	Желтый	Бледножелтый	Желтый	

ный состав продуктов конденсации (в %): С — 57,17; Н — 9,11; N — 10; O — 32,7.

Опыты в аквариумах с участием биологических факторов показали, что образование олигомеров фенолальдегидного типа может происходить в том случае, когда имеется дефицит растворенного кислорода и биогенных элементов, т. е. в таких условиях, когда окисление фенола не сопровождается разрывом бензольного кольца. С уменьшением концентрации фенола возможность его использования организмами как источника углерода повышается и при этом выход продуктов конденсации значительно снижается. Поэтому необходимым методическим условием протекания таких реакций является длительность опыта (месяцы, годы) при постоянном восполнении до исходной концентрации фенола, находящегося в воде аквариума. Кроме того, продукты конденсации извлекались из илов, в которых преобладали соединения, образованные в результате превращения фенола, а продукты природного органического вещества растений содержались в меньшем количестве и не препятствовали выделению первых.

Выделение продуктов конденсации из донных отложений водоемов более сложно ввиду наличия в иле и других смолистых веществ.

#### **Исследование донных отложений рек с целью определения в них продуктов конденсации фенолов и альдегидов.**

Исследовали донные отложения рек на участках поступления в них стоков, содержащих, помимо других органических соединений, фенолы и альдегиды. Образцы отбирали дночерпателем или скребком в количестве 5—10 кг. Вода в придонном слое имела рН 6,8—7,0.

У места отбора проб избыток воды удаляли отжатием ила и подсушиванием его на листах фильтровальной бумаги на воздухе. Для подавления микробных процессов ил фиксировался 100 мл хлороформа. В лаборатории отдельные порции образца (0,3—0,5 кг) обрабатывали хлороформом (3 раза по 300 мл) при комнатной температуре. С целью выделения из донных отложений ПКФ сухой остаток хлороформрастворимых веществ обрабатывали ацетоном. Ацетоновый раствор частично упаривали и выливали при перемешивании в 10 кратный избыток дистиллированной воды. После 6-часового отстаивания продукты ПКФ образовывали в воде тонкодисперсную взвесь, а жировые вещества всплывали. Водный раствор, содержащий тонкодисперсную взвесь, для освобождения от жировых остатков фильтровали через капроновое сито и через стеклянный фильтр № 1, а затем к раствору при перемешивании добавляли 2 мл концентрированной HCL. После суточного отстоя происходило расслоение водной тонкодисперсной смеси на 3 слоя: 1) маслянистый слой всплывал на поверхность (не исследовали); 2) водный слой; 3) осадок, содержащий преимущественно ПКФ. Последний анализировали (табл. 7).

После обработки донных отложений, отобранных из других рек, обнаружилось, что они не содержат ПКФ, а характер смол выде-

Таблица 7

**Характеристика продуктов конденсации фенолов и альдегидов,  
выделенных из донных отложений**

Места отбора проб	Концентрация хлороформ-растворимых веществ, % к сухому илу	Агрегатное состояние осадка	Свободный фенол, % к хлороформ-растворимым веществам	Гидроксильные группы, % к ПКФ	Метилolatedные группы, % к ПКФ	Общая характеристика
р. Лула	0,53	вязкое	1,14	14,77	9,07	Быстро твердеют на воздухе
р. Охта	—	вязкое	0,92	5,23	12,31	

Таблица 8

**Характеристика хлороформрастворимых веществ донных отложений  
и выделенных из них смол**

Место отбора	Содержание хлороформ-растворимых веществ, %	Агрегатное состояние	Хлороформрастворимые вещества			Общая характеристика смол
			свободный фенол, %	гидроксильные группы, %	метилolatedные группы, %	
р. Латка ниже с. Ченцово	0,02	мягкое	0,24	2,42	отсутств.	битумоиды
Красный ручей у Борка	0,15	вязкое	0,57	1,35	отсутств.	битумоиды
р. Черемуха в черте г. Рыбинска	0,29	жидко-вязкое	0,61	0,90	отсутств.	нефтяные битумы
Черная речка у пос. Волга	0,47	вязкое	1,43	0,73	отсутств.	битумы

ленных из хлороформрастворимых веществ, отличается от ПКФ (табл. 8). Таким образом, на основании физико-химических характеристик, приведенных в табл. 7 и 8, смолистые вещества, выделенные из донных отложений, можно разделить на 3 группы:

1. Битумоиды бытового происхождения [12] (см. табл. 8). В качестве примера приведена характеристика битумоидов рек Латка и Красного ручья. Они содержат гидроксильные группы (0,24—0,57%) и не содержат метилolatedных групп. По данным ИК — спектроскопии в битумоидах имеются метильные и метиленовые группы (полосы поглощения 2850 и 2950  $\text{см}^{-1}$ ), карбонильные группы в карбоксильной и сложноэфирной группировках (1730—1750  $\text{см}^{-1}$ ). Проба на отверждение отрицательная.

2. Нефтяные битумы [13]. В качестве примеров приведена характеристика битумов, выделенных из донных отложений р. Черемухи и Черной речки (табл. 9). Нефтяные битумы содержат небольшое количество гидроксильных групп (0,90—0,73%) и не содержат метилolatedных групп. Проба на отверждение отрицательная. По данным

**Элементный состав битумоидов и нефтяных битумов, выделенных из донных отложений, %**

Место отбора проб	C	H	N	S	O	C/H
Латка ниже Ченцово	75,83	9,71	0,82	3,12	10,52	7,7
Красный ручей у Борка	69,32	9,32	1,36	5,72	14,28	7,4
Черемуха в черте г. Рыбинска	67,41	8,32	1,0	8,42	14,85	8,1
Черная речка у пос. Волга	58,7	7,32	1,0	13,73	19,25	8,1

ИК — спектроскопии в нефтяных битумах имеются метильные и метиленовые группы и небольшое количество карбонильных групп в карбоксильной и сложноэфирной группировках (мало интенсивные полосы поглощения в области  $1730-1750\text{ см}^{-1}$ ).

Характерной особенностью ИК — спектров битумоидов и нефтяных битумов является незначительная интенсивность полосы поглощения  $1650\text{ см}^{-1}$ , характерная для колебаний ароматических колец по сравнению с ИК — спектрами фенолформальдегидных олигомеров, у которых эта полоса проявляется достаточно интенсивно (рис. 2).

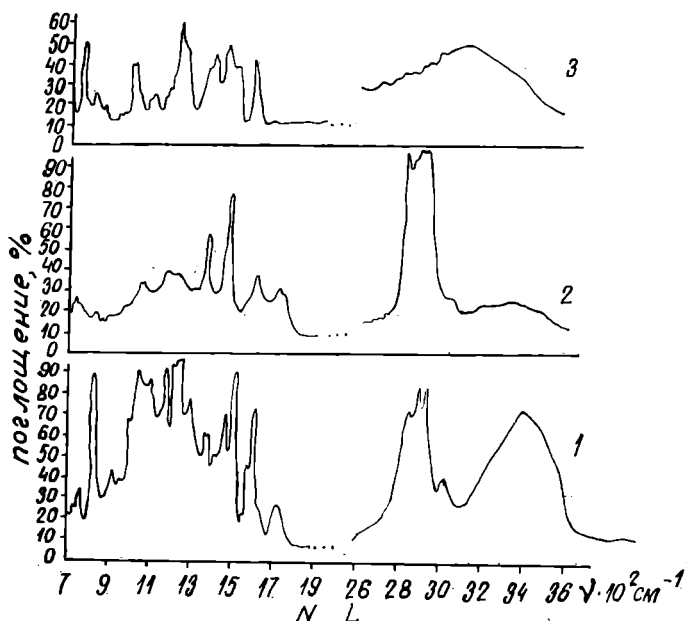


Рис. 2. ИК — спектры фенолформальдегидных смол, выделенных из донных отложений (1), синтезированных в колбе (3) и нефтяных битумов (2)



Элементный состав битумов и битумоидов (табл. 9) отличается от элементного состава фенолформальдегидных олигомеров (табл. 3) наличием серы, содержание которой достигает почти 14%.

3. ПКФ. Примером этой группы служат смолы, выделенные из осадка раствором ацетона и представляющие смолообразные вещества светложелтого цвета. Содержат гидроксильные и метилольные группы (табл. 7). По данным элементного анализа (табл. 10), в отличие от нефтяных битумов и битумоидов полученный осадок содержит незначительное количество серы и 69—71% углерода при соотношении  $C/H \approx 8$ .

Таблица 10

Элементный состав продуктов конденсации фенолов и альдегидов, выделенных из донных отложений, %

Место отбора проб	C	H	N	S	O	C/H
р. Лупа	71	8,1	1,0	отсут.	19,3	8,8
р. Охта	69,8	8,9	1,0	1,4	19,1	7,8

По данным ИК — спектроскопии, продукты конденсации имеют интенсивные полосы поглощения в области  $1650\text{ см}^{-1}$ , характерные для ароматических колец, и в области  $1250, 3500\text{ см}^{-1}$ , характерные для метилольных и гидроксильных групп соответственно.

Проба на отверждение, помимо данных ИК — спектроскопии, относится к наиболее легко определяемому показателю присутствия в донных отложениях ПКФ (табл. 11).

Таблица 11

Характеристика смол, выделенных из донных отложений рек Лупы и Охты

Водоем	Выделенные фракции	Содержание в % к сухому илу	Продолжительность отверждения продуктов конденсации при $150^\circ$ , в минутах	Содержание низкомолекулярных соединений в %
р. Лупа	Хлороформрастворимые (остаток)	0,34	25	—
	Ацетонрастворимые	0,16	15	9,6
р. Охта	Хлороформрастворимые (остаток)	0,23	не отверждается	—
	Ацетонрастворимые	0,10	20	6,1

В отвержденном продукте содержание низкомолекулярных соединений растворимых в хлороформе и ацетоне оказалось очень небольшим (6—9%), что свидетельствует о большом числе функциональных групп в его молекуле, способных участвовать в процессе полимеризации. Продолжительность отверждения ПКФ, выделенных из рек Лупы и Охты была в 2—3 раза короче, чем олигомеров фенолформальдегидного типа, полученных в лабораторных опытах.

Таким образом, на основании ИК-спектроскопии, элементного состава, условий отверждения можно считать, что продукты, выделенные из донных отложений рек Лупы и Охты, представляют собой олигомеры фенолформальдегидного типа.

### Выводы

1. Предложена принципиальная схема изучения процессов конденсации органических веществ в водоемах, рассмотренная на примере конденсации фенола и формальдегида.

2. Установлено, что процесс конденсации при низких концентрациях реагирующих веществ и при температуре 18—20° развивается очень медленно и требует большой длительности опыта.

3. Подтверждено, что процессы конденсации фенолов с альдегидами имеют место не только в аквариумах, моделирующих условия водоемов, но и в реках, на участках поступления сточных вод.

Авторы благодарят доктора хим. наук В. А. Сергеева за постоянное внимание к работе и за ценные советы, полученные в процессе ее осуществления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Запрометов М. Н. Основы биохимии фенольных соединений. М., 1974, с. 213.
2. Камшилов М. М. Буферность живой системы Журнал общей биологии. 1973, т. 34, № 2, с. 174—193.
3. Кастерина Т. Н., Калинин Л. С. Химические методы исследования синтетических смол и пластических масс. М., 1963, 284 с.
4. Кеньон Д., Стейнман Г. Биохимическое предопределение. М., 1972, 336 с.
5. Козлов Ю. П. Привитая сополимеризация как метод исследования свободных радикалов в биологических системах. М., 1970, 63 с.
6. Кононова М. М., Александрова И. В. Фенольные соединения почвы и их роль в образовании гумусовых веществ. В кн.: Фенольные соединения и их биологические функции. М., 1968, с. 302—310.
7. Коршак В. В., Виноградов С. В. Равновесная поликонденсация. М., 1968, 442 с.
8. Лурье Ю. Ю., Николаева З. В. Определение формальдегида и метилового спирта в промышленных сточных водах и других разбавленных растворах. Заводская лаборатория, 1954, т. 20, № 6, с. 674—681.
9. Манская С. М., Кодина Л. А. Геохимия лигнина. М., 1975, 230 с.
10. Николаев А. Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе. М.-Л., 1964, 784 с.
11. Ротмистров М. Н., Гвоздяк П. И., Ставская С. С. Микробная деструкция синтетических органических веществ. Киев, 1975, 222 с.
12. Синельников В. Е., Ширшова А. Н., Доброва Е. И. Изучение процессов полимеризации гидрофобных органических веществ в воде. В кн.: Биологическое самоочищение и формирование качества воды. М., 1975, с. 26—32.
13. Синельников В. Е. Люминесцентный анализ вод суши и моря. Обнинск, 1971, 170 с.
14. Синельников В. Е. К характеристике битумоидов как продуктов полимеризации органических веществ в водоемах. Гидробиологический журнал. 1973, № 3, с. 30—37.
15. Chudoba J., Nemec M., Nemcova B. Residual organic matter in activated sludge process effluents. II Degradation of saccharides and fatty acids under continuous conditions. Sbornik Vysoke školy chemicko-technologicke v Praze. 1968, B. 13, s. 27—43.
16. Kalle K. Über das Verhalten und die Herkunft der in den Gewässern und in der Atmosphäre Vorhandenen himmel blauen Fluoreszenz "Dtsch. hydrogr. Z.", 1963, v. 16, N 4, p. 153—166.
17. Reichert B. Die Mannich-reaktion. Springer Verl. Berlin. Göttingen. Heidelberg, 1959, s. 195.

## Микробиологическая характеристика Рыбинского водохранилища в 1972 г.

В течение 18 лет, начиная с 1954 г., на Рыбинском водохранилище с мая по ноябрь проводятся регулярные экспедиционные исследования через каждые 15 дней, с целью наблюдений над основными показателями, характеризующими уровень трофии данного водоема. Одновременно ведется разработка и проверка новых методов исследования водной микрофлоры. Изредка работы проводятся и в зимний период.

В 1972 г. наблюдения, как и в предыдущие годы, проводились на 6 стандартных и 5 дополнительных станциях (рис. 1). Для обозначения станций использованы в большинстве случаев названия затопленных или ближайших береговых населенных пунктов (см. таблицы).



Рис. 1. Карта-схема Рыбинского водохранилища  
В кружках — номера станций

Уровень воды в водохранилище в 1972 г. в период половодья был почти на 1,5 метра ниже нормального подпорного горизонта, затем началось его быстрое снижение и к концу года он был почти на два метра ниже, чем в предыдущем 1971 г. (рис. 2).

По данным Рыбинской гидрометеорологической обсерватории, поступление воды в водохранилище было максимальным в апреле

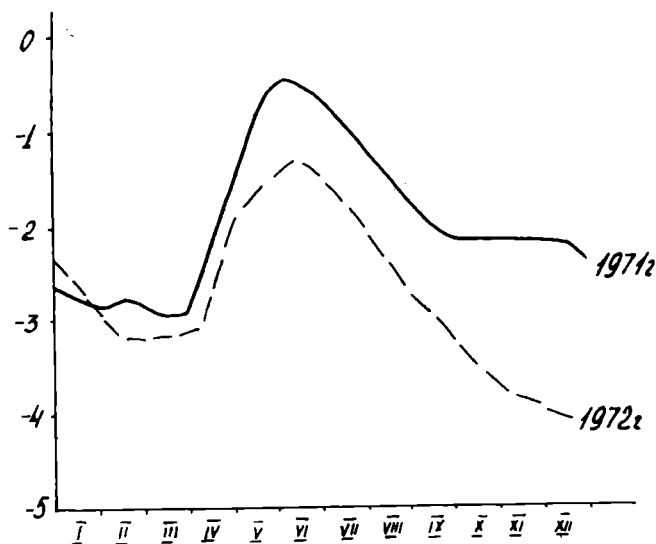


Рис. 2. Изменение уровня воды в Рыбинском водохранилище в 1971—1972 гг.

По оси ординат — уровни воды в условных отметках; по оси абсцисс — месяцы

(5,07 км<sup>3</sup>) и мае (2,85 км<sup>3</sup>) и резко упало в летние месяцы (табл. 1 и рис. 2). Положительный баланс был лишь в марте, апреле и мае. Сброс воды через плотину был наименьшим в мае.

Всего в 1972 г. в Рыбинское водохранилище поступило 15,677 км<sup>3</sup> воды и сброшено через гидроузел 19,422 км<sup>3</sup>. Годовой водный баланс был отрицательным и равнялся — 3,75 км<sup>3</sup>.

Весенний прогрев водохранилища начался в его южной части под влиянием волжских вод, где температура воды была выше, чем в центральной на 4,4°. В конце мая шло общее потепление воды. Максимальная температура воды наблюдалась в июле и в районе Волкова достигала 26,1°. В общем лето было теплое и вода выше 20°C была прогрета с середины июня до конца августа.

Максимальная прозрачность воды наблюдалась в средней части водохранилища и в конце июня в районе Среднего Двора достигала 290 см по диску Секки. Средняя прозрачность за весь вегетационный период равнялась 150 см (табл. 2).

В 1972 г. уровень водохранилища был относительно низким и это сказалось на более высокой электропроводности воды (табл. 3). по сравнению с годами с высоким уровнем воды. В течение зимы электропроводность повышалась особенно в тех районах, где сказывалось влияние волжской воды, и в районе Коприно достигла 475 мкСм и здесь же, в период паводка 5—6 мая, упала до 175 мкСм. Дольше всего высокая электропроводность сохранялась в центральной части водохранилища, где задерживаются зимние

Таблица 1

## Водный баланс Рыбинского водохранилища в 1972 г. (млн. м³)

Составляющие баланса	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Сумма за год
Приток через угличский гидроузел	445	208	1093	2009	745	397	179	107	83	75	150	332	5823
Приток через Шекснинский гидроузел	386	403	138	156	530	225	61	48	86	294	211	151	2689
Боковая приточность	256	192	258	2908	1582	513	245	168	163	815	250	415	7165
Суммарный приток	1087	803	1481	5073	2847	1135	485	323	332	1584	611	898	15677
Сброс через Рыбинский гидроузел	2834	1609	1339	1174	501	1325	2036	2306	1858	1819	1541	1050	19422
Аккумуляция	-1747	-806	+142	+3899	+2346	-190	-1541	-1983	-1526	-1235	-930	-152	-3745

Таблица 2

## Прозрачность воды по диску Секки в Рыбинском водохранилище в 1972 г. (см)

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Среднее
	5-6	22-24	8-10	23-25	11-13	20-25	8-10	22-24	15-20	5-10	3-4	
1. Коприно	140	170	145	160	150	150	110	110	110	125	130	140
2. Молога	140	140	130	130	170	120	100	120	110	105	105	120
5. Измайлово	—	210	205	270	260	100	190	210	165	65	—	150
6. Ср. Двор	—	250	250	290	240	165	190	170	170	110	70	170
7. Наволок	115	215	210	270	260	150	200	170	185	75	50	170
9. Брейтово	170	200	185	250	200	160	180	190	155	125	100	170
10. Волково	—	160	150	140	190	130	190	200	120	—	—	160
11. Противье	—	170	160	190	140	120	120	155	150	135	—	150
12. Весегонское	—	150	130	160	160	110	80	140	165	105	—	170
расширение	—	190	170	190	160	140	150	120	105	115	—	150
15. Мяска	—	140	—	80	90	90	70	50	55	55	—	80
16. Усть Суды	—	140	170	190	180	130	140	150	135	100	90	—
Среднее	140	180	170	190	180	130	140	150	135	100	90	—

Примечание: (—) — здесь и во всех последующих таблицах обозначает, что наблюдения не проводились.

воды. Затем после летнего периода стабилизации — 220—225 мкСм, с конца августа и до сентября упала до 187 мкСм.

Интенсивность фотосинтеза фитопланктона определялась изотопным методом в модификации В. И. Романенко [10]: Интегрированная проба воды отбиралась на станции. После внесения изотопа 100 мл ее инкубировалось 1 час при постоянном освещении 2500 люкс в люминостате. Образец этой же воды инкубировался сутки в аквариуме на борту экспедиционного судна. Отношение суточной интенсивности фотосинтеза к таковому в люминостате давало коэффициент, который отражает влияние освещенности данного дня на фотосинтез. На этот коэффициент умножались величины продукции фитопланктона за 1 час при экспонировании в люминостате в пробах, отобранных в этот день на других станциях.

Расчет продукции органического вещества под 1 м<sup>2</sup> поверхности водоема производился по формуле:

$$\Phi_{\text{м}} = \Phi_{\text{л}} \cdot 0,7 \cdot l \cdot 1000$$

где:  $\Phi_{\text{м}}$  — величина фотосинтеза под 1 м<sup>2</sup> (г С/л·сутки<sup>-1</sup>),  $\Phi_{\text{л}}$  — величина фотосинтеза в интегрированной по глубине торфогенного слоя пробе воды (г С/л·сутки<sup>-1</sup>), 0,7 коэффициент связи между интенсивностью фотосинтеза и прозрачностью воды по диску Секки,  $l$  — прозрачность воды по диску Секки (м), 1000 — литры воды в 1 м<sup>3</sup>.

По продукции фитопланктона при стандартных условиях освещения в какой-то мере можно судить о распределении фитопланктона по акватории водохранилища. Из табл. 4 видно, что оно было неравномерным, в центральной части количество его было почти в 10 раз меньше, чем в южной в устье р. Суды, у с. Противье или в мелководном Весьегонском расширении, затопленном водами р. Мологи.

Аналогичные опыты по продукции фитопланктона были проделаны в таких же условиях с водой, которая предварительно была профильтрована через мембранный фильтр с диаметром пор 5—6 мкм [9].

Анализы показали (табл. 5), что в Рыбинском водохранилище основная масса органического вещества образуется в процессе фотосинтеза планктонными водорослями размером более 5—6 мкм. Водорослями меньшего размера в среднем за вегетационный период продуцируется около 11% органического вещества, при этом весной во время развития диатомей больше — до 25%, а летом при развитии сине-зеленых — меньше, до 7%.

Первый очаг фотосинтеза, когда водохранилище еще не полностью освободилось от льда, наблюдался в первых числах мая в открытой части в районе Наволока и достигал 0,5 мг С/л·сутки<sup>-1</sup> (табл. 6). К концу мая интенсивность фотосинтеза здесь начала снижаться и усилилась в районе, занятом волжскими водами, и в устье р. Суды. В связи с прогревом воды увеличение фотосинтеза наблюдалось в конце мая, в дальнейшем в начале июня был спад

Электропроводность воды Рыбинского водохранилища в 1972 г. (мксм)

Номер и название станции	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Средняя
	20	14—19	14—18	3—7	5—6	22—24	8—10	23—25	11—13	20—25	8—10	22—24	15—20	5—10	3—4	
1. Коприно	295	337	362	457	175	179	174	184	199	198	199	209	184	196	195	236
2. Молога	338	355	376	389	195	203	212	201	210	212	209	215	163	184	185	243
5. Измайлово	229	235	244	364	—	262	236	240	240	224	235	224	—	184	—	224
6. Ср. Двор	222	263	256	—	—	238	244	244	226	231	232	216	182	184	186	229
7. Наволок	235	272	278	241	309	261	242	246	239	233	234	227	200	187	183	239
9. Брейтово	233	286	296	300	277	199	257	237	224	229	229	—	189	188	188	238
Средняя	258	298	301	334	239	223	227	225	223	221	223	218	183	187	187	—

Таблица 4

Интенсивность фотосинтеза в натуральной воде при постоянном освещении в Рыбинском водохранилище в 1972 г. (мкг С/л·сутки<sup>-1</sup>)

[illegible]

Интенсивность фотосинтеза в профильтрованной воде в Рыбинском водохранилище в 1972 г.  
(мкг *C/l.сутки*<sup>-1</sup>)

Номера и название станций	Май	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь		Среднее отношение нефилтрованной: фильтрованной воде
	22—24	8—9	23—25	11—13	20—25	8—10	22—24	15—16	5—10	3—4	нефилттр.	
1. Коприно	3,4	1,28	1,0	2,4	2,1	1,57	1,65	1,8	0,19	0,56	20,9	13,1
2. Молога	1,66	2,27	2,7	4,7	4,1	2,3	1,4	1,1	0,52	0,29	18,9	9,0
5. Измайлово	0,49	0,64	0,7	2,5	2,0	1,49	0,8	0,72	1,2	—	8,0	7,2
6. Ср. Двор	0,77	0,42	0,37	2,4	2,4	2,3	1,9	1,1	1,2	0,43	8,8	6,6
7. Наволок	0,87	0,2	0,78	2,3	2,3	2,0	1,7	1,56	1,1	0,29	8,1	6,7
9. Брейтово	0,53	0,43	1,0	2,5	2,6	2,9	0,7	0,43	0,4	0,43	10,5	8,8
филтрованная вода (В)	1,28	0,87	1,09	2,8	2,68	2,09	1,7	0,95	0,77	0,4	—	—
Среднее нефилтрованная вода (А)	12,1	3,7	4,5	14,7	24,8	26,1	14,9	11,0	7,6	5,5	—	—
Отношение $\frac{A}{B}$	9,5	4,2	4,1	5,3	9,3	12,0	8,8	11,6	9,9	13,7	—	—



## Интенсивность фотосинтеза в Рыбинском водохранилище в 1972 г. в натуральной воде

(мкг  $C/l \cdot сутки^{-1}$ )

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь		Ноябрь		Средняя						
	22—24		8—9		23—25		11—13		20—25		8—10		22—24			15—20		5—10		3—4	
	5—6																				
1. Коприно	0,14	0,59	0,17	0,21	0,48	0,57	3,0	0,77	0,33	0,09	0,23	0,60									
2. Молога	0,15	0,77	0,21	0,24	0,9	0,73	1,87	0,32	0,25	0,12	0,11	0,51									
6. Ср. Двор	—	0,11	0,02	0,04	0,27	0,6	0,41	0,57	0,11	0,03	0,11	0,23									
5. Измайлово	—	0,37	0,03	0,04	0,23	0,44	0,35	0,27	0,11	0,03	—	0,17									
7. Наволок	0,51	0,29	0,04	0,05	0,18	0,37	0,34	0,5	0,13	0,036	0,05	0,23									
9. Брейтово	0,19	0,16	0,04	0,09	0,77	0,47	0,45	0,39	0,12	0,08	—	0,28									
10. Волково	—	0,25	0,15	0,32	0,22	0,44	0,30	0,17	0,16	—	—	0,25									
11. Противье	—	0,19	0,20	0,47	1,70	0,61	0,56	0,14	0,12	0,04	—	0,37									
12. Восьгонское расширение	—	0,14	0,21	0,51	0,33	0,46	0,99	0,13	0,18	0,048	—	0,33									
15. Мяска	—	0,19	0,17	0,11	0,90	0,67	0,52	0,41	0,09	0,05	—	0,35									
16. Устье Суды	—	0,59	0,46	1,15	2,68	1,15	1,13	0,83	0,1	0,054	—	0,90									
Средняя	0,25	0,33	0,15	0,29	0,79	0,59	0,90	0,41	0,15	0,06	0,12	—									
Средняя $г C/m^2$ . в сутки <sup>-1</sup>	0,73	1,15	0,23	0,47	1,07	0,80	1,90	0,87	0,21	0,06	0,25	—									
В тоннах на все водохранилище за сутки	2640	4400	900	1800	4000	2830	6550	2840	680	176	715	—									

до 0,15 мг С/л·сутки<sup>-1</sup>, и постепенное увеличение произошло в начале июля до 0,79 мг с/л·сутки<sup>-1</sup>. Второй максимум продукции фитопланктона был отмечен в первой декаде августа у Коприна и в районе г. Мологи (3—1,87 мг С/л·сутки<sup>-1</sup>).

Деструкция органического вещества в водохранилище в летний период определялась по снижению содержания кислорода в изолированном объеме нефильтрованной (табл. 7) и фильтрованной (табл. 8) воде при инкубации в темных склянках при температуре воды водоема. Весной и глубокой осенью, когда деструкция органического вещества по потреблению кислорода не учитывалась ввиду низкой чувствительности метода, анализы проводились с использованием изотопов по величине гетеротрофной ассимиляции углекислоты [7]. Величины деструкции определялись в поверхностном слое воды и пересчитывались на весь столб от поверхности до дна водохранилища [2, 6]. Наибольшая суммарная деструкция растворенного и взвешенного органического вещества (0,37—0,49 мг С/л·сутки<sup>-1</sup>) наблюдалась в июле и в конце августа на ст. 1 и 2, где сказывается влияние волжских вод, и у Ср. Двора. В этом году деструкция органического вещества в августе была намного меньше, чем в 1969 г., когда она равнялась 0,88 мг С/л·сутки<sup>-1</sup>. Наименьшие величины ее были отмечены в центральной части водохранилища (табл. 7) и к осени она снизилась до 0,02 мг С/л·сутки<sup>-1</sup>.

В 1972 г. одновременно деструкция органического вещества определялась в воде, профильтрованной через мембранный фильтр № 6 в порах в 4—5 мк. Это дало возможность удалить из воды основную массу взвешенных частичек и судить об интенсивности разрушения растворенных и частично коллоидных органических веществ. За сутки количество разрушающегося растворенного органического вещества составляет примерно половину от деструкции общего органического вещества (табл. 9). Если принять по [11], что общее содержание органического вещества в воде Рыбинского водохранилища равно примерно 12 мг С/л, то в летний период за сутки разрушается примерно 1,5%.

Как показали наблюдения предыдущих лет, значительная деструкция органического вещества идет в иловых отложениях в аэробных и анаэробных условиях. В 1972 г. эти определения не проводились.

Наблюдения над общей численностью бактерий в Рыбинском водохранилище ведутся методом прямого счета на мембранных фильтрах [10]. В 1972 г. они проводились и в зимний период (табл. 9). С января по апрель общее количество бактерий, в среднем по 6 станциям, снизилось с 1,55 до 1,0 млн/мл; далее оно резко возросло до 1,8 млн/мл и достигло максимума 2,24—2,63 млн/мл в конце июня и в начале июля. Затем к ноябрю вновь снизилось до 1,16 млн/мл. Среднее количество бактерий за летний период с мая по ноябрь в маловодном 1972 г. (1,76 млн/мл) было выше, чем в многоводном 1969 г. (1,58 млн/мл).

Как показали наблюдения Е. П. Никифоровой и В. И. Романенко

Таблица 7  
Суммарная деструкция растворенного и взвешенного органического вещества в Рыбинском водохранилище  
в 1972 г. в натуральной воде (мкг  $C/l \cdot сутки^{-1}$ )

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Среднее
	5—6	22—24	8—10	23—25	11—13	20—25	8—10	22—24	15—20	Октябрь 5—10	
1. Коприно	0,06	0,24	0,10	0,18	0,27	0,25	0,38	0,26	0,20	0,015	0,21
2. Молога	0,07	0,23	0,14	0,35	0,35	0,24	0,37	0,39	0,13	0,014	0,25
5. Измайлово	—	0,19	0,07	0,15	0,17	0,25	0,19	0,40	0,06	0,03	0,17
6. Ср. Двор	—	0,17	0,05	0,12	0,19	0,24	0,23	0,49	0,07	0,02	0,18
7. Наволок	0,09	0,19	0,09	0,11	0,15	0,18	0,11	0,21	0,13	0,02	0,13
9. Брейтово	0,06	0,15	0,11	0,29	0,31	0,23	0,23	0,18	0,18	0,02	0,17
Среднее	—	0,19	0,09	0,20	0,24	0,23	0,24	0,32	0,1	0,02	—
В т с все водохрани- лище	1217	3737	1769	3858	4519	3956	3984	4736	1434	257	

Таблица 8  
Деструкция органического вещества в Рыбинском водохранилище в 1972 г. в профильтрованной воде  
(мкг  $C/l \cdot сутки^{-1}$ )

Номер и название станции	Май	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	Октябрь	Среднее
	22—24	8—10	23—25	11—13	20—25	8—10	22—24	15—20	5—10	
1. Коприно	0,13	0,07	0,15	0,18	0,16	0,15	0,12	0,07	0,015	0,116
2. Молога	0,12	0,12	0,12	0,18	0,13	0,14	0,19	0,05	0,007	0,117
5. Измайлово	0,07	0,06	0,08	0,10	0,12	0,10	0,12	0,03	0,015	0,077
6. Ср. Двор	0,05	0,05	0,08	0,13	0,12	0,10	0,13	—	0,015	0,084
7. Наволок	0,07	0,05	0,07	0,10	0,08	0,07	0,08	0,06	0,025	0,067
9. Брейтово	0,09	0,023	0,11	0,13	0,08	0,09	0,023	0,05	—	0,075
Среднее	0,088	0,062	0,10	0,14	0,11	0,11	0,11	0,05	0,015	—

Примечание: для перехода от кислорода к углероду использовался коэффициент 0,375.

Общая численность бактерий в Рыбинском водохранилище в 1972 г.  
(млн/мл)

Номер и название станции	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Средняя за период с мая по ноябрь
	20-22	14-19	14-18	3-8	5-6	22-24	8-10	23-25	11-13	20-25	8-10	22-24	15-20	5-10	3-4	
1. Котрино	1,85	2,86	1,37	1,55	1,41	0,84	1,36	2,78	3,29	2,66	2,50	2,30	2,11	1,05	0,69	1,91
2. Молога	1,42	1,42	2,03	1,53	1,29	2,78	2,21	2,51	4,20	0,98	1,97	2,33	1,35	0,82	1,10	1,96
5. Измайлово	1,26	1,37	1,04	0,89	—	1,27	1,56	1,50	3,47	1,13	1,22	1,50	1,77	1,88	—	1,70
6. Ср. Двор	1,80	1,36	1,33	1,08	—	1,82	1,88	1,99	1,69	1,04	1,57	2,09	1,69	1,23	1,20	1,62
7. Наволок	2,09	0,78	0,52	0,57	2,01	1,90	1,79	2,09	1,53	1,08	1,72	1,35	1,51	1,63	1,40	1,64
9. Брейтово	0,9	0,95	0,78	0,52	2,45	2,10	2,23	2,60	1,59	0,82	1,78	1,73	1,64	1,10	1,42	1,77
Средняя	1,55	1,45	1,18	1,0	1,80	1,78	1,84	2,24	2,63	1,28	1,79	1,88	1,68	1,28	1,16	—

[4], практически все бактерии, учитываемые методом прямого микроскопирования, способны развиваться на минимальных концентрациях органических веществ, присутствующих в воде естественных водоемов, в частности Рыбинского водохранилища. Сюда относятся *Caulobacter*, *Hyphomicrobium*, *Arthrobacter*, *Corinobacterium* и другие виды [3]. При развитии на органическом веществе они одновременно фиксируют 6% свободной углекислоты в реакции Вуда и Веркмана [2, 5]. Автотрофные бактерии в поверхностных слоях Рыбинского водохранилища практически встречаются лишь в минимальном количестве, т. к. благоприятные экологические условия для их развития спорадически наблюдаются лишь в бывших руслах Мологи, Шексны и Волги. Таким образом, вся темновая фиксация углекислоты происходит в процессе усвоения органического вещества гетеротрофными бактериями.

Как обычно гетеротрофная ассимиляция углекислоты определялась изотопным методом [10]. Вода разливалась в темные склянки, в нее добавлялся раствор  $\text{NaH}_2^{14}\text{CO}_3$  и инкубировалась сутки при температуре водоема. После этого бактерии отфильтровывались на мембранном фильтре № 2 и радиоактивность бактерий на фильтре, после обработки его соляной кислотой, определялась под торцевым счетчиком.

На основании темновой фиксации  $\text{CO}_2$  (табл. 10) была рассчитана продукция биомассы бактерий за 24 часа, причем было принято, что темновая фиксация углекислоты составляет 6% биомассы. Наибольшая продукция бактериальной биомассы наблюдалась в районе Мологи в начале августа (табл. 11). В среднем в большинстве рейсов она колебалась от 20 до 80 мкг С/л·сутки<sup>-1</sup>. Снижение продукции биомассы бактерий в открытой части водохранилища началось во второй половине сентября и достигло минимальной величины в начале октября на станциях 1 и 9, когда температура воды снизилась до 6—7°C.

Для выяснения роли фитопланктона в темновой фиксации углекислоты одновременно по той же схеме были проведены определения темновой фиксации углекислоты в воде, профильтрованный через мембранный фильтр, чтобы очистить ее от фитопланктона (табл. 12).

Из сравнения данных таблиц 11 и 12 видно, что цифры за один и тот же срок анализа колеблются в ту или в другую сторону, но практически совпадают (1,89 нефильтрованная и 1,24 мкг С л/сутки фильтрованная). Это говорит о том, что у фитопланктона темновая фиксация углекислоты практически отсутствует и приводимые нами данные по продукции биомассы бактерии в Рыбинском водохранилище получают добавочное подтверждение.

На основе общей численности бактерий (табл. 9) была рассчитана их биомасса. Условно было принято, что 1 бактерия имеет объем 0,5 мк<sup>3</sup>, влажность 85% и содержание углерода в сухой биомассе — 50%. Зная биомассу, выраженную в углероде и ее прирост за сутки (табл. 11) можно было определить и время генерации бактерий (g) по формуле:

Темновая ассимиляция  $\text{CO}_2$  в натуральной воде Рыбинского водохранилища в 1972 г.  
(мкг  $\text{C}/\text{л} \cdot \text{сутки}^{-1}$ )

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь	Октябрь	Среднее
	5-6	22-24	8-10	23-25	11-13	20-25	8-10	22-24	15-20	5-10	
1. Коприно	1,05	1,43	1,45	1,22	2,75	3,67	5,2	4,0	2,46	0,42	2,37
2. Молога	1,28	2,07	1,84	1,62	2,70	3,59	6,8	4,1	3,22	0,83	2,81
5. Измайлово	—	0,88	1,0	1,23	2,42	3,03	4,1	5,3	1,67	0,67	2,21
6. Ср. Двор	—	0,75	0,9	1,19	4,04	5,15	3,7	6,8	1,58	0,75	2,76
7. Наволок	1,67	0,88	1,01	1,14	1,93	2,27	2,63	5,2	2,27	0,57	1,96
9. Брейтово	1,05	0,89	1,07	1,38	2,8	2,28	3,75	5,05	1,13	0,51	1,99
Среднее	1,26	1,15	1,21	1,29	2,77	3,33	4,36	5,07	2,05	0,62	2,31
нефилт- рованной	—	1,23	1,43	1,43	1,44	1,95	2,39	2,78	2,50	1,76	1,87
фильтро- ванной	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
В т. С на все водохра- нилище	21,9	22,6	24,0	24,9	50,9	57,3	72,4	75,0	29,4	7,9	—

Продукция бактериальной биомассы в Рыбинском водохранилище в 1972 г.  
(мкг С/л·сутки<sup>-1</sup>)

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь	Октябрь		Средняя
	5-6	22-24	8-10	23-25	11-13	20-25	8-10	22-24	15-20	5-10		
1. Коприно	18	24	24	20	46	61	87	67	41	07		39
2. Молога	21	35	31	27	45	59	114	68	54	14		47
5. Измайлово	—	15	17	21	40	51	68	88	28	11		38
6. Ср. Двор	—	13	15	19	87	86	62	113	26	12		48
7. Наволок	28	15	17	19	32	38	44	87	38	09		33
9. Брейтово	18	15	18	23	47	38	63	84	19	08		33
Средняя	21	19	20	21	50	55	73	84	34	10		—
Продукция в т. С на весь водоем в сутки	365	362	401	413	918	978	1168	1294	468	125		—

$$q = \frac{t \cdot \lg 2}{\lg B - \lg b}$$

где  $t$  — длительность опыта в часах;  $b$  — начальная биомасса;  $B$  — конечная биомасса ( $b+P$ ), где  $P$  — продукция бактерий во время опыта.

Поскольку в естественном биоценозе озерной воды разные виды бактерий размножаются с разной скоростью, правильнее говорить о времени удвоения численности бактерий, а не о времени их генерации (табл. 13).

В начале зимы бактерии практически не размножались. К апрелю месяцу, несмотря на то, что температура воды водохранилища осталась неизменной, удвоение численности бактерий происходило за 50—90 часов. Шло ли приспособление бактерий к низким температурам или сменился их видовой состав, осталось невыясненным. Весной при низких температурах воды особенно в средней части водохранилища время удвоения численности составляло 60—90 часов. По мере прогрева воды, образования и выделения органических веществ фитопланктоном, диффузии их из иловых отложений в воду и при иных благоприятных условиях, размножение бактерий в воде Рыбинского водохранилища ускорялось до одной двух генераций в сутки. С октября, в связи с похолоданием, время удвоения численности бактерий постепенно удлинялось и приближалось к 100—115 часам. Таким образом, быстрота размножения бактерий в условиях Рыбинского водохранилища сильнее всего зависит от температуры воды, как мы это наблюдали и в предыдущие годы [2].

Приведенные материалы позволили с известной степенью приближения сделать ряд обобщений. Данные расчетов на весь водоем, выраженные в тоннах углерода за одни сутки, представлены в табл. 14. Сопоставление величины продукции органического вещества за счет фотосинтеза и его биологической деструкции показывает, что в относительно маловодном 1972 г., когда годовой баланс воды в водохранилище составлял (—) 3,75 км<sup>3</sup>, деструкция органического вещества была эквивалентна его продукции и заметно превышала продукцию только в осенние месяцы. На основании табл. 14 по динамике продукции органического вещества фитопланктона и его деструкции графическим методом были определены суммарные величины указанных процессов за вегетационный период длительностью 184 дня. Данные расчетов приведены ниже:

Показатель	На весь водоем, т	Под 1 м <sup>2</sup> , г С
Интенсивность фотосинтеза фитопланктона	450 000	127
Деструкция органического вещества в воде	540 000	153
Темновая ассимиляция углекислоты	7 700	2,18
Продукция бактериальной биомассы	128 000	36,3



**Темновая фиксация углекислоты в фильтрованной воде Рыбинского водохранилища в 1972 г.**  
(мкг C/л·сутки<sup>-1</sup>)

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь		Средняя						
	22—24		8—10		23—25		11—13		20—25		8—10			22—24		15—20		5—10	
1. Коприно	1,40	0,95	0,88	3,23	1,76	1,91	3,33	1,51	0,20	1,69	0,20	1,69							
2. Молога	0,96	1,14	1,57	1,76	2,04	1,83	2,13	1,14	0,21	1,42	0,21	1,42							
5. Измайлово	0,70	0,73	0,60	1,58	1,33	1,76	1,10	0,79	0,52	1,01	0,52	1,01							
6. Ср. Двор	0,57	0,67	0,66	1,91	1,49	1,99	1,76	0,49	0,59	1,13	0,59	1,13							
7. Наволок	0,94	0,62	0,72	1,28	1,28	1,84	1,30	0,59	0,42	0,99	0,42	0,99							
9. Брейтово	1,00	0,87	0,88	1,84	2,19	1,66	1,38	0,40	0,18	1,17	0,18	1,17							
Средняя	0,93	0,85	0,90	1,93	1,70	1,83	1,83	0,82	0,35	—	0,35	—							

**Время удвоения численности бактерий в воде Рыбинского водохранилища (час.)**

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь	Октябрь		Среднее
	5-6	22-24	8-10	23-25	11-13	20-25	8-10	22-24	15-20	5-10		
1. Коприно	59	95	43	91	57	33	25	21	39	97	56	
2. Молога	47	61	55	68	68	23	17	29	23	108	55	
5. Измайлово	—	61	66	52	67	21	18	17	42	114	57	
6. Ср. Двор	—	98	88	34	20	15	23	18	47	68	51	
7. Наволок	54	90	74	75	36	28	32	16	24	110	60	
9. Брейтово	96	75	74	74	28	63	25	15	62	90	67	
Среднее	64	80	66	66	46	30	23	19	39	98	—	

Таблица 13

Таблица 12

Таблица 14

Интенсивность фотосинтеза, деструкция органического вещества и продукция бактериальной биомассы в Рыбинском водохранилище в 1972 г.

Показатель	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь	Октябрь	Ноябрь
	1	15	1	15	1	15	1	15	15	1	1
Площадь водохранилища, км <sup>2</sup>	3603	3744	3879	3924	3834	3730	3531	3438	3213	3038	2851
Фотосинтез г С/м <sup>2</sup> -сутки <sup>-1</sup>	0,73	1,15	0,23	0,47	1,07	0,8	1,9	0,87	0,21	0,06	0,25
т С на весь водоем за сутки	2640	4400	900	1800	4000	2830	6550	2840	680	176	715
Объем водохранилища, км <sup>3</sup>	17,38	19,08	20,05	19,67	18,37	17,2	16,0	15,40	14,34	12,04	11,96
Деструкция в воде мг С/л-сутки <sup>-1</sup>	0,07	0,19	0,09	0,2	0,24	0,23	0,24	0,32	0,1	0,02	—
в воде т. С на весь водоем за сутки	1217	3737	1769	3858	4519	3956	3984	4736	1434	257	—
Продукция бактериальной биомассы в воде в т. С на весь водоем за сутки	365	362	401	413	918	978	1168	1294	468	125	—

Таблица 15

Эффективность использования солнечной энергии фитопланктоном в Рыбинском водохранилище в 1972 г.

Показатели	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Сумма и средняя
Поглощенная солнечная радиация, тыс. ккал/м <sup>2</sup>	122	151	150	103	56	21	603
Валовая продукция органического вещества фитопланктона, тыс. ккал/м <sup>2</sup>	0,37	0,14	0,35	0,49	0,11	0,04	1,50
Эффективность использования солнечной энергии фитопланктоном, %	0,30	0,09	0,23	0,48	0,20	0,19	0,25

Необходимо отметить, что, по сравнению с предыдущими годами, первичная продукция фитопланктона была очень высока и в 4 раза превышала продукцию 1964 г., в 5,5 раза превышала продукцию 1965 г. и была почти вдвое больше, чем в 1969 г. Деструкция же органического вещества не намного превышала обычный уровень. Бактериальная продукция была почти вдвое меньше, чем в 1965 г. и приближалась к величине, наблюдавшейся в 1969 г.

Данные по солнечной радиации в районе водохранилища за 1972 год были нам любезно предоставлены Рыбинской гидрометеорологической обсерваторией. Это дало возможность определить количество солнечной энергии, используемой фитопланктоном в процессе фотосинтеза (табл. 15). Поскольку радиоуглеродный метод, в применявшейся нами модификации, не учитывает количество фотосинтезированного органического вещества, которое было использовано в процессе дыхания [7] и выделено прижизненно в окружающую среду [12], то при расчетах величины продукции фитопланктона (табл. 15) были помножены на коэффициент 1,5.

С мая по август включительно солнечная радиация колебалась в пределах от 150 до 103 тысяч ккал на 1 м<sup>2</sup> поверхности водохранилища в месяц (табл. 15), а с наступлением осени резко снизилась. Наиболее эффективное использование солнечной радиации фитопланктоном наблюдалось в августе (0,48%), а в остальные месяцы вегетационного периода использовалось лишь около 0,2% радиации. Средняя с мая по ноябрь 1972 г. эффективность использования сол-

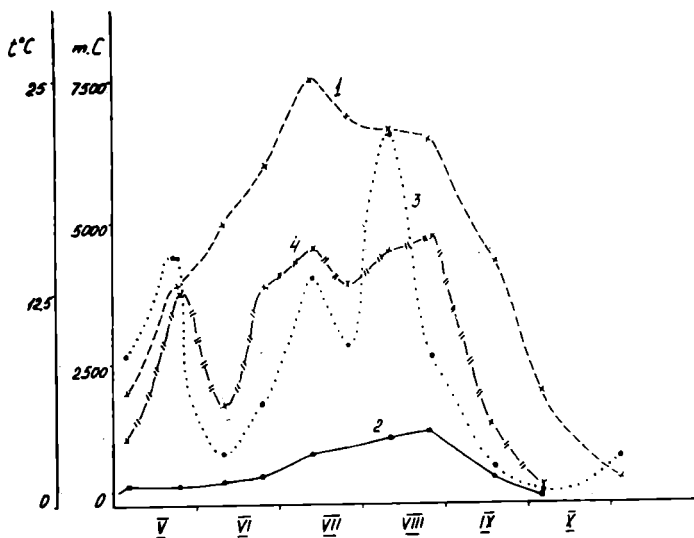


Рис. 3. Интенсивность биологических процессов в воде Рыбинского водохранилища в 1972 г.

По оси ординат, слева — температура воды (°C), справа — органическое вещество (м. С), по оси абсцисс — месяцы. 1 — температуры воды, 2 — продукция бактериальной биомассы, 3 — интенсивность фотосинтеза фитопланктона по 14 С, 4 — деструкция органического вещества

нечной энергии в процессе фотосинтеза была равна 0,25%, что почти в 2 раза выше, чем в другие годы. Сезонная динамика основных процессов представлена на рис. 3.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов С. И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. Л., 1970, 440 с.
2. Кузнецов С. И., Романенко В. И., Кузнецова Н. С. Микробиологическая характеристика Рыбинского водохранилища в 1969 г. В кн.: Органическое вещество и элементы гидробиологического режима волжских водохранилищ. Л., 1972, с. 13—23.
3. Лаптева Н. А. Электронно-микроскопическое изучение микрофлоры Рыбинского водохранилища. Микробиология, 1976, т. 45, вып. 3, с. 547—551.
4. Никифорова Е. П. и Романенко В. И. Развитие бактерий на органических веществах воды из Рыбинского водохранилища при низкой температуре. Информ. бюлл. «Биол. внутр. вод», 1974, № 22, с. 15—18.
5. Романенко В. И. Потенциальная способность микрофлоры воды к гетеротрофной ассимиляции углекислоты и к хемосинтезу. Микробиология, 1963, т. 32, вып. 4, с. 668—674.
6. Романенко В. И. Гетеротрофная ассимиляция  $\text{CO}_2$  бактериальной флорой воды. Микробиология, 1964, т. 33, вып. 4, с. 679—683.
7. Романенко В. И. Соотношение между фотосинтезом фитопланктона и деструкцией органического вещества в водохранилищах. В кн.: Микрофлора, фитопланктон и высшая водная растительность внутренних водоемов. Л., 1971, с. 61—74.
8. Романенко В. И. и Романенко В. А. Деструкция органического вещества в иловых отложениях Рыбинского водохранилища. В кн.: Физиология водных организмов и их роль в круговороте органического вещества, Л., 1969, с. 24—31.
9. Романенко В. И. и Добрынин Э. Г. Потребление кислорода, темновая ассимиляция  $\text{CO}_2$  и интенсивность фотосинтеза в натуральных и профильтрованных пробах воды. Микробиология, 1973, т. 42, вып. 4, с. 573—575.
10. Романенко В. И. и Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. (Лабораторное руководство). Л., 1974, 193 с.
11. Скопинцев Б. А. и Бакулина А. Г. Органическое вещество в водах Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутренних вод АН СССР, вып. 13(16), с. 3—32.
12. Fogg, G. E. and Westlake D. E. The importance of extracellular products of algae in fresh waters. Verh. Int. Ver. limnol. 1955, v. 12, p. 219—231.

*С. И. Кузнецов, В. И. Романенко, Н. С. Кузнецова,  
А. И. Саралов*

#### **Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества и фиксации молекулярного азота в Рыбинском водохранилище в 1973 г.**

Регулярное наблюдение за динамикой численности бактерий, продукцией и деструкцией органического вещества в воде Рыбинского водохранилища проводятся с 1956 года. Год от года определяются отдельные микробиологические процессы. В 1973 году круг исследований был расширен определением интенсивности фиксации свободного азота ацетиленовым методом.

В 1973 г. регулярные наблюдения проводились на 6 основных и 3 дополнительных станциях. Пробы отбирались из поверхностного слоя воды. При определении фотосинтеза и усвоения свободного

азота брали интегрированные пробы в эвфотической и темновой зонах водохранилища.

Расположение станций на водохранилище было следующее: ст. 1 — Коприно, ст. 2 — у затопленного г. Мологи, 5 ст. — к юго-западу от Измайлова, ст. 6 — у Среднего Двора, ст. 7 — в центре водохранилища у затопленного с. Наволок, ст. 9 — к северо-востоку от с. Брейтово, ст. 11 — с. Противье у Дарвинского заповедника, ст. 18 — против с. Волково, ст. 15 — против с. Мяксы на бывшем русле р. Шексны<sup>1</sup>.

По данным Рыбинской гидрометеорологической обсерватории поступление воды в водохранилище достигло максимума в апреле. Уровень воды в водохранилище был низким уже 3 год подряд и не достигал нормального подпорного горизонта в период максимального наполнения на 1,7 м. Падение уровня началось уже во второй половине мая и продолжалось до начала октября (рис. 1). Максимальная площадь водного зеркала в 1973 г. равнялась 3739 км<sup>2</sup> и снизилась осенью до 2918 км<sup>2</sup>, т. е. 1632 км<sup>2</sup> земель находилось в обсохшем состоянии.

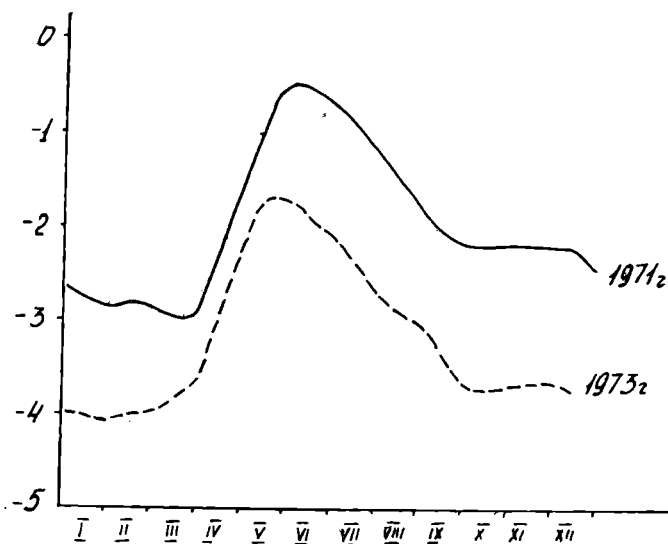


Рис. 1. Уровень воды в Рыбинском водохранилище в 1971 и 1973 гг.

По оси ординат — уровень воды относительно НПГ в м, по оси абсцисс — месяцы

Водный баланс Рыбинского водохранилища представлен в табл. 1. В 1973 г. в водохранилище поступило 18,258 км<sup>3</sup> воды и было сброшено 14,586 км<sup>3</sup>. Если не учитывать количество осад-

Примечание: Карту-схему водохранилища см. в первой нашей статье данного сборника.

## Водный баланс Рыбинского водохранилища в 1973 г.

(млн. м<sup>3</sup>)

Составляющие баланса	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Сумма за год
Приток через Угличский гидроузел	247	312	833	1682	729	360	200	228	142	346	568	327	5974
Приток через Шекснинский гидроузел	95	101	107	324	627	52	56	159	277	279	394	186	2657
Боковая приточность	219	162	204	3924	1108	351	202	189	225	368	403	299	1647
Осадки на зеркало водохранилища	47	132	84	188	92	156	174	218	268	166	177	93	1795
Приток за счет водообмена с грунтом	3	—	—	—	—	22	36	25	17	3	—	10	116
Возврат потерь на оседание льда и снега	—	—	—	69	—	—	—	—	—	—	—	—	69
Суммарный приток	611	707	1228	6187	2556	941	668	812	929	1162	1542	915	18258
Сброс через Рыбинский гидроузел	718	389	517	433	1446	1809	2182	1912	1620	1176	1076	1907	14586

ков, выпавших на водное зеркало водохранилища, и испарение, то водный баланс был положительным и составлял  $+3,7 \text{ км}^3$ .

Прогрев воды в водохранилище начался в начале мая и к середине этого месяца температура воды достигла  $8^\circ\text{C}$ . Более холодная вода ( $6^\circ\text{C}$ ) сохранилась в Шекснинском плесе, более теплая — на ст. 1, заполненной волжскими водами. Наибольший прогрев воды ( $22^\circ\text{C}$ ) наблюдался во второй половине июля (табл. 2).

Наибольшая электропроводность воды ( $256 \text{ мкСм}$ ) наблюдалась в центральной части водохранилища, где скопились зимние воды. Снижение электропроводности наблюдалось в речных плесах, заполненных водами Шексны, Волги и Мологи. Выравнивание величин электропроводности по всей акватории началось во второй половине августа, что указывает на полное перемешивание воды во всем водохранилище (табл. 3).

Наибольшая прозрачность воды по диску Секки наблюдалась в первых числах июля и достигала в районе Измайлова  $310 \text{ см}$ , а в среднем по водохранилищу в этот период равнялась  $245 \text{ см}$  (табл. 2). Резкое снижение ее до  $85 \text{ см}$  наступило в конце августа — начале сентября. В противоположность относительно многоводному 1971 г., когда прозрачность была стабильна,  $150 \text{ см}$ , в маловодном 1973 г. наблюдались ее сильные колебания обусловленные неравномерным распределением фитопланктона (табл. 5).

Распределение карбонатов изменялось синхронно с колебанием величин электропроводности. Более мягкие воды с пониженной электропроводностью наблюдаются в районах занятых речными водами, количество карбонатов в которых колеблется в пределах  $15\text{—}18 \text{ мг С/л}$  (табл. 4).

Интенсивность фотосинтеза фитопланктона определялась радиоуглеродным методом по В. И. Романенко [5, 6]. Пробы воды экспонировались при постоянном освещении  $2500 \text{ лк}$  в люминистате, что позволяет судить о распределении фитопланктона по акватории водохранилища (табл. 5). Ежедневно одна проба воды после внесения меченого карбоната экспонировалась в течение суток при естественном освещении на палубе судна и таким образом интегрировала все изменения инсоляции за эти сутки (табл. 6). Отношение интенсивности фотосинтеза при суточной экспозиции и при часовой в люминистате одной и той же пробы воды давало коэффициент, на который умножались результаты часового фотосинтеза, полученные на всех других станциях в течение этого дня, чтобы получить суточные величины интенсивности фотосинтеза в поверхностном слое воды. Расчет продукции фитопланктона под  $1 \text{ м}^2$  поверхности водоема производился по формуле, описанной в первой статье данного сборника [3].

Распределение жизнедеятельных водорослей в эвфотической зоне по акватории водохранилища было весьма неравномерным и в начале июля и июня в средней части водохранилища водорослей было в  $15\text{—}19$  раз меньше, чем у Коприна. Это хорошо согласуется и с большой прозрачностью воды в центральной части водохранилища в этот период (табл. 2). В среднем же, судя по интенсивности

Температура воды °С и прозрачность ее по диску Секки (см) в Рыбинском водохранилище в 1973 г.

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь		Среднее										
	11—13		22—24		6—8		20—22		30—2		18—20			2—4		14—17		12—13		21—23		24—26	
1. Коприно, температура	10,0	14,3	18,2	18,4	21,1	21,3	18,2	19,8	11,9	9,1	3,2	—	—										
прозрачность	130	130	110	150	155	95	105	95	100	155	170	125	125										
2. Молога, температура	9,0	13,6	18,3	17,9	20,8	21,2	17,5	19,6	11,0	8,2	1,5	—	—										
прозрачность	130	130	180	110	195	105	95	80	80	115	65	115	115										
5. Измайлово, температура	8,2	13,4	19,3	18,0	21,2	22,0	17,7	20	10,8	—	—	—	—										
прозрачность	150	220	270	210	310	190	180	115	75	—	—	190	190										
6. Ср. Двор, температура	6,4	13,7	19,2	17,2	21,1	22,0	18,9	19,1	11,2	8,0	2,2	—	—										
прозрачность	265	205	230	180	265	200	130	95	85	85	65	165	165										
7. Наволок, температура	8,2	12,8	19,0	18,0	21,0	21,2	18,5	19,5	11,4	8,2	1,4	—	—										
прозрачность	120	235	275	170	270	155	125	65	80	90	40	145	145										
9. Брейтово, температура	8,4	14,2	18,9	17,1	20,8	21,7	18,6	18,6	10,4	8,5	1,2	—	—										
прозрачность	150	150	200	140	270	120	165	75	95	115	110	140	140										
Средняя температура	8,4	13,7	18,8	17,8	21,0	21,6	18,4	19,4	11,1	8,4	1,9	—	—										
Средняя прозрачность	155	180	210	130	245	145	125	85	85	110	90	—	—										

Примечание: (—) — здесь и в последующих таблицах обозначает отсутствие наблюдений.



Электропроводность воды в Рыбинском водохранилище в 1973 г. (мкСм)

Номера и название станций	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь		Средняя
	11—13	22—24	6—8	20—22	1—2	18—20	2—4	14—17	12—13	21—23	24—26		
1. Коприно	159	162	158	167	173	172	188	191	194	203	222	181	
2. Молога	195	184	184	187	197	192	214	193	198	198	208	195	
5. Измайлово	199	207	223	214	214	210	206	209	180	—	—	206	
6. Ср. Двор	226	226	213	215	204	214	202	208	184	200	202	209	
7. Наволок	234	256	230	220	211	206	202	202	198	197	197	214	
9. Брейтопо	185	194	191	211	210	207	204	201	199	200	200	200	
Средняя	199	205	198	202	201	200	202	201	192	199	206	—	

Таблица 4

## Содержание карбонатов в воде Рыбинского водохранилища в 1973 г. (мг С/л)

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь		Среднее
	11—13	22—24	8—8	20—22	1—2	18—20	2—4	14—17	12—13	21—23	24—26		
1. Коприно	14,6	15,2	14,6	17,4	16,2	18,0	19,8	22,2	19,2	24,0	25,2	18,8	
2. Молога	18,0	17,6	17,6	18,6	18,4	17,8	19,8	21,4	19,8	22,4	21,2	19,3	
5. Измайлово	19,4	20,6	21,6	21,6	21,0	20,2	22,0	21,0	19,8	—	—	20,8	
6. Ср. Двор	21,8	17,4	19,2	20,2	20,2	21,6	22,2	22,8	21,0	19,8	19,8	20,5	
7. Наволок	22,8	21,6	23,8	19,4	20,4	18,8	21,6	24,0	20,4	22,2	21,0	21,5	
9. Брейтово	15,8	18,9	18,8	21,0	22,2	20,4	19,4	20,4	22,2	22,8	21,0	20,3	
Среднее	18,7	18,6	19,3	19,7	19,7	19,4	20,8	21,9	20,4	22,2	21,6	—	

Таблица 5

Интенсивность фотосинтеза в эвфотической зоне Рыбинского водохранилища в 1973 г. при постоянном освещении 2500 лк  
(мкг С/л·час<sup>-1</sup>)

Номер и название станции	Май		Июль		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь		Средняя
	11—13	22—24	6—8	20—22	1—2	18—20	2—4	14—17	12—13	21—23	24—26		
1. Коприно	8,0	28,5	34,4	4,8	31,0	46,0	47,5	27,0	5,8	5,5	5,2	22,1	
2. Молога	29,5	21,9	16,6	6,6	14,6	44,0	37,0	33,8	11,9	14,1	18,8	22,6	
3. Измайлово	7,0	2,9	2,5	3,3	2,0	8,8	16,6	23,1	13,3	—	—	8,8	
4. Ср. Двор	6,6	7,1	3,9	6,1	2,5	13,5	32,1	14,7	18,7	12,3	9,4	11,5	
5. Наволок	17,5	5,0	1,8	3,7	6,8	17,1	26,0	25,6	16,0	15,4	9,2	13,1	
6. Брейтово	9,9	11,8	4,0	7,8	4,2	27,7	40,5	16,0	12,9	13,0	7,5	14,0	
Средняя	13,1	12,9	10,5	5,4	10,2	26,3	33,3	23,2	11,9	12,1	10,0	—	

Таблица 6  
Интенсивность фотосинтеза в эвфотической зоне в Рыбинском водохранилище при естественном освещении в 1973 г.  
(мгк  $C/a \cdot сутки^{-1}$ )

Номер и название станции	(мне С.И.Стегник)										Средняя	
	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь			Октябрь
	11—13	22—24	6—8	20—22	1—2	18—20	2—4	14—17	12—13	21—23		
1. Коприно	174	655	885	127	1415	2100	3040	505	41	52	50	819
2. Молога	531	504	427	175	664	2006	2370	630	84	133	182	700
5. Измайлово	126	67	64	87	91	401	1060	430	94	—	—	269
6. Ср. Двор	119	163	100	162	114	616	2050	275	133	116	98	359
7. Наволок	315	115	46	98	309	780	1660	480	113	145	88	377
9. Брейтово	178	271	103	207	191	1260	2590	299	132	122	70	493
Средняя	241	296	271	143	161	1197	2130	436	99	113	97	—
Интенсивность фотосинтеза (г С/м <sup>2</sup> ·сутки <sup>-1</sup> )	0,43	0,59	0,54	0,27	0,93	1,79	3,18	0,42	0,08	0,13	0,10	—
Продукция в т. С на все водохрани- лище	1600	2200	1990	970	3300	6050	10500	1300	240	390	290	—

Таблица 7  
Интенсивность деструкции органического вещества в воде Рыбинского водохранилища в 1973 г. (мг  $C/a \cdot сутки^{-1}$ )

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь		Средняя
	11-13	22-24	6-8	20-22	1-2	18-20	2-4	14-17	12-13	21-23	24-26		
1. Коприно	0,052	0,150	0,323	0,023	0,225	0,214	0,176	0,124	0,002	0,011	0,021	0,120	
2. Молога	0,124	0,079	0,244	0,094	0,214	0,270	0,169	0,540	0,028	0,011	0,018	0,163	
5. Измайлово	0,075	0,105	0,079	0,045	0,158	0,131	0,105	0,143	0,028	—	—	0,096	
6. Ср. Двор	0,090	0,068	0,049	0,068	0,068	0,191	0,184	0,101	0,026	0,011	0,023	0,080	
7. Наволок	0,101	0,083	0,07	0,034	0,09	0,158	0,195	0,109	0,030	0,018	0,011	0,082	
9. Брейтово	0,109	0,184	0,191	0,124	0,113	0,289	0,54	0,113	0,013	0,018	0,015	0,155	
Средняя	0,092	0,111	0,159	0,065	0,145	0,209	0,228	0,190	0,021	0,014	0,017	—	
Деструкция средняя в т. С на все водохрани- лище за сутки	1690	2045	2940	1130	2470	3270	3510	2730	278	180	210	—	

Общее количество бактерий в воде Рыбинского водохранилища в 1973 г. (млн/мл)

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Среднее
	11-13	22-24	6-8	20-22	1-2	18-20	2-4	14-17	12-13	21-23	
1. Коприно	0,62	1,35	1,74	1,18	0,92	1,37	0,84	0,99	1,08	0,45	1,05
2. Молога	0,66	0,97	0,87	1,37	0,98	0,83	1,07	1,25	1,55	0,42	0,99
5. Измайлово	0,72	1,01	0,71	0,91	0,94	0,73	0,54	1,70	2,01	—	1,03
6. Ср. Двор	0,71	0,76	0,68	0,64	1,51	1,18	1,10	1,01	2,37	0,92	1,09
7. Наволок	0,54	1,01	1,62	0,41	0,58	—	1,45	1,53	0,90	0,65	0,96
9. Брейгово	0,99	0,82	0,55	2,32	0,67	1,36	0,75	1,12	0,60	0,41	0,96
Среднее	0,70	0,99	1,03	1,14	0,93	1,09	0,96	1,26	1,42	0,57	—
Время генерации (час)	21	18	21	33	18	13	11	18	39	40	—

фотосинтеза при постоянном освещении, в 1973 г. развитие фитопланктона во вторую половину лета было в 2 с лишним раза интенсивнее, чем в 1971 маловодном году.

Фактические данные по интенсивности фотосинтеза при постоянном освещении в 1 л интегрированных по глубинам эвфотической зоны пробах воды показывают, что первый максимум продукции фитопланктона наблюдался в конце мая, в конце июля наступил спад и затем в июле и августе продукция достигла максимальных величин. В этот период в районе Коприна она достигла 3 мг С/л·сутки<sup>-1</sup>, а средняя величина ее по всем станциям равнялась 2,1 мг С/л·сутки<sup>-1</sup>, 3,18 г С/м<sup>2</sup>·сутки<sup>-1</sup>, или 10,5 тыс. тонн С за сутки во всем водохранилище. Эти величины почти в 10 раз выше тех, которые наблюдались в 1971 г. с более высоким уровнем воды. Из этого следует, что от года к году в зависимости от метеорологических и гидрологических факторов продукция органического фитопланктона резко изменяется.

Деструкция органического вещества в водохранилище в летний период определялась по снижению содержания кислорода при инкубации в течение суток изолированного объема воды в темноте при температуре водоема. Пересчет потребленного кислорода на углерод производился путем умножения величины потребленного кислорода на коэффициент  $K = 0,375 \times 0,8 = 0,3$  [7].

Как и в предыдущие годы, величины деструкции органического вещества определялись в эвфотической зоне и пересчитывались затем на весь столб воды.

Наибольшая деструкция органического вещества, более 0,5 мг С/л·сутки<sup>-1</sup>, наблюдалась в августе в районе г. Мологи и Брейтова. При этом максимум ее на две недели был позднее максимума продукции органического вещества фитопланктона. Процесс разложения веществ сильно замедлился в начале сентября, когда температура воды снизилась до 11° (табл. 7).

Мы привели здесь данные по деструкции органического вещества в водной массе водохранилища. Но как показали анализы 1971 г. [2] разложение органического вещества интенсивно протекает и в иловых отложениях, как в аэробных так и в анаэробных условиях. Подобных наблюдений в этом году не проводилось. Очевидно поэтому, а также и оттого, что это уже был третий год подряд с низким уровнем воды, продукция органического вещества впервые за много лет превысила за навигационный период его деструкцию.

Учет общей численности бактерий проводили путем прямого микроскопирования на мембранных фильтрах [7]. В этом году не наблюдалось резко выраженного весеннего максимума, лишь в середине сентября в среднем общая численность бактерий достигала 1,42 млн. в 1 мл (табл. 8). Наибольшие количества отмечались в отдельных пробах воды в районе Коприно, Брейтово и Наволока. Средняя же численность бактерий в 1973г. с низким уровнем воды в водохранилище, равнялась 0,94 млн/мл, при значительном колебании по акватории во время съемок от 0,41 до 2,32 млн/мл.

По численности бактерий была рассчитана их биомасса. Средний объем одной бактерии был принят равным  $0,5 \text{ мк}^3$ , влажность 85% и содержание углерода в биомассе 50% от ее сухого веса.

Темновая ассимиляция углекислоты определялись изотопным методом. В склянку вносили 60 мл испытуемой воды, в нее добавляли 1 мл  $\text{Na}_2^{14}\text{CO}_3$  с активностью около  $1 \cdot 10^6$  имп/мин/мл. Инкубацию проводили 24 часа в темноте при температуре водоема, бактерии отфильтровывали и определяли их радиоактивность. Продукция бактериальной биомассы в углероде за 24 часа рассчитана исходя из величин темновой ассимиляции  $\text{CO}_2$ . Принято, что 6% биомассы бактерий образуется за счет гетеротрофной ассимиляции углекислоты [4].

Темновая ассимиляция углекислоты в течение летнего периода колебалась в пределах от 2 до 5 мкг С на л в сутки и лишь в июле и в августе на некоторых станциях достигала 10 мкг С/л·сутки<sup>-1</sup>. Такие величины отмечены над бывшим руслом реки Мологи, где повышенные значения гетеротрофной ассимиляции могли быть связаны с деятельностью бактерий, окисляющих метан, который образуется при распаде органического вещества иловых отложений.

Наибольшая продукция биомассы бактерий (110—120 мкг С/л·сутки<sup>-1</sup>) наблюдалась в июле и в августе, в среднем же за весь сезон составляла 50,7 мкг С/л·сутки<sup>-1</sup> (табл. 9). По сравнению с многоводным 1971 г., когда бактериальная продукция равнялась 27,2 мкг С/л·сутки<sup>-1</sup>, в маловодном 1973 г. указанная величина была почти в два раза выше и была связана с большой быстротой размножения бактерий.

Исходя из величины биомассы и продукции бактерий, мы рассчитали время удвоения их численности (табл. 10). Расчет описан в нашем руководстве [7]. В 1973 году в течение всего вегетационного периода время генерации не превышало 1 суток, лишь во второй половине июня и в сентябре было равно 33—40 часам. Наиболее быстро бактерии размножались в конце июля и августа, когда время удвоения их численности в среднем по всем станциям равнялось 11—13 часам.

Изучение микробиологических процессов в 1973 г. было дополнено определениями фиксации свободного азота. Активность фиксации свободного азота синезелеными водорослями и бактериями в воде и иловых отложениях определялась ацетиленовым методом. Метод был предложен Стевартом [12], проверен Харди, Кайрном и другими [10, 11]. В нашей стране на водоемах он впервые был использован А. И. Сараловым [8, 9]. Сущность метода заключается в том, что ферментная система азотфиксирующих микроорганизмов, восстанавливающая азот до аммиака, восстанавливает также ацетилен до этилена.

Предварительно водоросли концентрировались на мембранном фильтре из 150—200 мл воды, фильтр вносили в склянку объемом 40 мл наполненную на  $\frac{1}{3}$  водой из водохранилища и заполняли газовой смесью, состоящей из ацетилена, углекислоты, кислорода и аргона, или из ацетилена, углекислоты и аргона при анализе фик-

Таблица 9

Темновая ассимиляция  $\text{CO}_2$  и продукция бактериальной биомассы в воде Рыбинского водохранилища в 1973 г.  
(мкг  $\text{C}/\text{л}\cdot\text{сутки}^{-1}$ )

Номер и название станции	Май		Июнь			Июль	Август		Сентябрь		Октябрь		Средняя
	12	23	6	20	30		2	14	12	21	Октябрь		
											24		
1. Коприно	1,18	3,25	5,35	2,15	4,00	5,46	5,30	3,90	1,29	0,73		0,39	3,30
2. Молога	3,00	6,66	4,40	2,47	4,05	10,5	6,05	4,95	1,67	0,62	0,73	4,10	
5. Измайлово	1,65	1,56	1,48	0,88	2,34	3,50	4,48	6,00	1,87	—	—	2,64	
6. Ср. Двор	1,29	1,98	2,15	1,32	2,30	5,05	9,20	3,95	1,66	0,59	0,56	2,73	
7. Наволок	2,92	1,86	1,41	1,33	2,75	5,30	8,15	4,32	2,67	0,63	0,50	2,89	
9. Брейтово	2,03	2,69	1,67	1,78	2,75	10,1	10,0	2,48	0,82	0,68	0,24	3,20	
Средняя	2,01	3,00	2,74	1,65	3,03	6,65	7,19	4,27	1,66	0,65	0,48	—	
Темновая ассимиляция в т С на все водохранилище за сутки	36,9	55,3	50,6	28,7	51,7	107,4	109,0	61,4	21,9	8,4	5,9	—	
Продукция бактерий в мкг С/л·сутки-1	33,6	50,1	45,8	27,6	50,6	111	120	71,3	27,7	10,9	8,0	—	
Продукция бактерий в т С на все водохранилище за сутки	617	923	846	480	862	1790	1820	1030	367	140	99	—	

сации азота в донных отложениях. Пробы ила инкубировали при температуре водоема 12—14 час, а пробы воды — на свету и в темноте 4 час.

После этого их фиксировали сулемой и на газовом хроматографе определяли количество образовавшегося этилена.

Фиксация молекулярного азота в воде впервые была зарегистрирована в начале июня в поверхностном слое, когда в планктоне появились синезеленые водоросли *Anabaena* и *Aphanizomenon* в Шекснинском и Главном плесах (табл. 10). Наличие процесса отмечалось и в темноте, но значительно слабее чем на свету. Данные по азотфиксации в воде хорошо коррелируют с динамикой численности указанных водорослей. Максимальная интенсивность фиксации азота наблюдалась в конце июля и конце августа и достигла в Моложском плесе  $42-70 \text{ мгN/м}^2 \cdot \text{сутки}^{-1}$ . В Волжском и Шекснинском плесе фиксация не превышала  $2-15 \text{ мгN/м}^2 \cdot \text{сутки}^{-1}$ .

Из табл. 11 можно рассчитать, что в 1973 г. фитопланктоном было фиксировано 1600 т свободного азота или 0,5 г азота на  $1 \text{ м}^2$  за весь вегетационный период, что составляет около 8% от общей суммы азота, принесенного с речными водами в водохранилище за весь год, или несколько меньше 10% от концентрации общего азота в воде водохранилища.

Динамика связывания молекулярного азота в грунтах водохранилища представлена на табл. 11. На всех станциях, независимо от грунтов, отмечается 2 четко выраженных максимума фиксации свободного азота — весной и осенью. Как правило, фиксация азота наиболее активно шла в слое от 2 до 10 см от поверхности ила и была связана с деятельностью факультативно анаэробных микроорганизмов, относящихся к роду *Clostridium*. Осенний максимум фиксации азота, по-видимому, бывает связан с осадением на дно свежего органического вещества отмершего фитопланктона. Зимой интенсивность фиксации резко снижается из-за низкой температуры ила, приближающейся к  $0^\circ\text{C}$  и вновь возникает весной при его прогреве. Подтверждением этому служат лабораторные опыты, которые показали, что при повышении температуры ила, отобранного в водохранилище в феврале, с 2 до  $25^\circ\text{C}$  фиксация свободного азота ускоряется в 6—7 раз.

Суточная величина фиксации свободного азота связана с характером грунта водохранилища. В слабо заиленной почве в летний период она равнялась  $1,3 \text{ мг N/м}^2 \cdot \text{сутки}^{-1}$ , в торфянистом иле 1,4, в песках 2,6, а при наличии наилка достигает 4,3, в сером иле — 6,9. В среднем по водохранилищу, с учетом площадей, занятых разными типами грунтов, фиксация азота равнялась  $2,0 \text{ мгN/м}^2 \cdot \text{сутки}^{-1}$ . Зимой фиксацию азота в слое 0—2 см обнаружить не удалось.

Путем посевов 1 мл ила на питательные среды в сером иле удалось обнаружить до 100 тыс. клеток *Clostridium* и до 10 тыс. клеток *Azotobacter*.

В среднем за вегетационный период в иловых отложениях Рыбинского водохранилища было фиксировано 1400 т свободного азота и около 300 т за 5 месяцев зимнего периода.



Фиксация свободного азота в воде Рыбинского водохранилища в 1973 г. ( $\text{мг N}/\text{м}^2 \cdot \text{сутки}^{-1}$ )

Номер и название станции	Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
	6-8	21-22	1-2	18-20	2-4	11-17	12-13	21-23
1. Коприно	0	0,47	1,85	6,28	13,17	7,53	4,58	2,43
2. Молога	0,10	0,76	0,90	3,14	3,20	8,91	2,82	2,86
5. Измайлово	0	0	0,45	1,36	2,31	2,51	2,22	2,43
6. Ср. Двор	0	1,90	0,95	2,04	1,14	4,71	1,92	2,29
7. Наволок	0	0,47	0,45	1,95	2,96	3,77	3,93	3,03
9. Брейтово	0	0	0,45	4,33	1,11	6,11	10,98	3,36
11. Противье	0	0,47	18,0	70,0	31,0	42,0	3,63	2,01
15. Против с. Мякса	0,95	0,95	1,80	1,95	1,34	3,71	1,16	0,81
18. Напротив с. Волково	0,95	3,80	3,06	3,14	7,17	12,61	—	—
Водохранилище 1 N (средняя) $\text{мг N}/\text{м}^2 \cdot \text{сутки}^{-1}$ т N за сутки	0,27	1,33	1,74	6,66	5,40	8,15	3,81	2,53
	1,0	4,8	6,1	22,7	17,6	25,6	11,0	7,2

Фиксация молекулярного азота в донных отложениях Рыбинского водохранилища в 1973 г. ( $\text{мкгN/м}^2\text{сутки}^{-1}$ )

Название станции	Слой грунта в см	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь	
		10-12	22-21	6-8	21-22	1-2	13-20	2-4	14-15	12-13	21-23
1. Коприно	0-2	—	—	7,2	7,2	7,0	10,1	10,3	16,6	12,0	11,5
	2-10	3,6	7,2	15,6	15,6	36,5	19,7	19,9	53,0	29,0	13,0*
	10-20	3,6	109,2	15,6	19,2	30,2	29,3	21,4	27,1	15,8	13,0
2. Молога	0-2	—	—	9,6	13,2	39,8	6,7	15,1	17,0	17,0	13,9
	2-10	20,4	110,4	26,4	16,8	33,4	10,6	11,8	23,0	34,8	21,4
	10-20	20,4	164,4	21,6	16,8	21,8	19,4	13,0	20,4	32,4	14,6
5. Измайлово	0-2	—	—	3,6	7,2	11,0	9,4	5,5	14,6	11,8	—
	2-10	3,6	15,6	57,6	26,4	30,0	10,8	6,2	29,3	15,8	—
6. Ср. Двор	0-2	—	—	6,0	6,0	6,5	8,1	16,3	14,9	9,6	5,3
	2-10	25,2	57,6	48,0	15,6	18,0	12,2	21,4	23,0	14,2	12,5
7. Наволок	0-2	—	—	4,8	7,2	16,3	17,5	9,1	20,6	8,2	12,2
	2-10	6,0	4,8	28,8	4,8	15,6	8,6	13,2	29,8	10,8	16,8
9. Брейгово	0-2	—	—	3,6	14,4	40,8	15,1	9,1	21,4	9,1	9,8
	2-10	12,0	69,6	46,8	37,2	79,4	12,2	25,0	32,4	16,6	12,2
11. Противные	0-2	—	—	6,0	1,2	12,7	14,4	31,0	27,1	7,9	12,0
	2-10	10,8	40,8	69,8	13,2	46,1	8,6	33,4	52,6	18,0	9,6
15. Мякса	0-2	—	—	6,0	14,4	25,9	6,2	37,0	19,1	10,8	5,0
	2-10	30,2	18,0	85,2	16,8	49,9	6,2	21,8	39,4	9,8	6,5
	10-20	30,2	123,6	57,6	30,0	73,3	9,4	29,0	35,0	9,8	7,9
18. Волково	0-2	—	—	10,8	16,8	24,0	10,8	4,6	18,0	—	—
	2-10	28,8	130,8	46,8	58,8	42,0	23,5	18,6	17,5	—	—
	10-20	28,8	121,2	49,2	46,8	55,3	21,4	9,8	26,9	—	—
Водохранилище $\text{мгN/м}^2\text{сутки}^{-1}$ на всю площадь $\text{тN/сутки}^{-1}$		0,82	2,64	4,59	1,26	2,88	1,32	1,65	2,83	1,46	1,55
		3,0	9,8	17,2	4,6	10,3	4,6	5,5	9,1	4,5	4,6

Полученные материалы позволили сделать пересчет на весь объем водохранилища (табл. 12). Поскольку все расчеты строятся по 6 станциям, они могут характеризовать лишь порядок величин, хотя соответствующие сопоставления, сделанные по анализам 1970 г. по 12 станциям подтвердили [1], что 6 стандартных станций выбраны удачно и хорошо характеризуют процессы, протекающие в Рыбинском водохранилище. Сопоставление продукции органического вещества в виде фитопланктона и бактериальной биомассы с деструкцией в водной массе показывает, что в июле и начале августа в маловодном 1973 г. первичная продукция преобладала над деструкцией, что было отмечено впервые за период многолетних наблюдений. Наибольшие величины деструкции были отмечены в июле и августе, что находится в соответствии с суточной продукцией бактериальной биомассы (табл. 9).

Интенсивность процессов фиксации свободного азота определялась активностью развития синезеленых водорослей *Анабаена* и *Арханизоменоп*. Количество фиксированного азота за год обуславливалось интенсивностью этих процессов в Главном плесе, площадь которого составляет 70% от всего водохранилища.

По осредненным данным, на основании таблиц 10, 11 и 12 построены графики динамики процессов фиксации азота, продукции и деструкции органического вещества. По площадям, ограниченным осью абсцисс и кривыми динамики, графическим методом определены величины указанных процессов за 180 дней вегетационного периода. Суммарные результаты процессов за 1973 г. представлены ниже.

Показатель	На весь водоем	Под 1 м <sup>2</sup>
Продукция фитопланктона	430 200 т С	129 г С
Деструкция органического вещества в воде	312 000 т С	94 г С
Продукция бактериальной биомассы	139 000 т С	42 г С
Фиксация свободного азота в воде	1 600 т N	0,5 г N
Фиксация свободного азота в иловых отложениях	1 400 т N	0,4 г N

Деструкция органического вещества в водной массе в 1973 г. равнялась 312 000 т С на водохранилище, или 94 г на 1 м<sup>2</sup>, что близко к результату в многоводный 1971 г., когда она была равна 310 000 т С на все водохранилище, или 79 г С на 1 м<sup>2</sup> [2]. Значительно большие многолетние колебания наблюдаются в продукции органического вещества в процессе фотосинтеза фитопланктона. Год от года величины продукции органического вещества колеблются следующим образом: 1964 г. — 117 000, 1965 — 83 000, 1969 — 216 000, 1970 — 370 000, 1971 — 216 000, 1973 — 430 000 т С за вегетационный период во всем водохранилище. Резкие изменения наблюдаются и в продукции бактериальной биомассы: 1965 г. — 231 000, 1970 — 99 000 т С за тот же период.

Данные по солнечной радиации за 1973 г., любезно представленные нам Рыбинской гидрометеорологической обсерваторией, были

**Продукция фитопланктона, деструкция органического вещества, гетеротрофная ассимиляция  $\text{CO}_2$  и фиксация молекулярного азота в Рыбинском водохранилище в 1973 г. (средние величины)**

Показатели		Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь
		11-17	22-24	6-8	20-22	1-2	18-20	2-4	14-17	12-13	21-23	24-26
Площади, км <sup>2</sup>		3613	2726	3739	3658	3568	3447	3312	3213	3047	2944	2918
Фотосинтез	г $\text{C}/\text{м}^2\cdot\text{сутки}^{-1}$	0,43	0,59	0,54	0,27	0,93	1,79	3,18	0,42	0,08	1,13	0,10
	т. С на все водохранилище в сутки	1600	2200	1990	970	3300	6050	10500	1300	240	390	290
Объем в км <sup>3</sup>		17,41	1837	18,48	17,80	17,04	16,15	15,14	14,39	13,25	13,0	12,40
Деструкция	мг $\text{C}/\text{л}\cdot\text{сутки}^{-1}$	0,092	0,111	0,159	0,065	0,145	0,209	0,228	0,190	0,021	0,014	0,017
	т. С на все водохранилище в сутки	1690	2045	2940	1130	2470	3270	3510	2730	278	180	210
Гетеротрофная ассимиляция $\text{CO}_2$	мкг $\text{C}/\text{л}\cdot\text{сутки}^{-1}$	2,01	3,00	2,74	1,65	3,03	6,65	7,19	4,27	1,66	0,65	0,48
	т. С на все водохранилище в сутки	36,9	55,3	50,6	28,7	51,6	107,4	109,0	61,4	21,9	8,4	5,9
Фиксация свободного азота	мг $\text{N}/\text{м}^2\cdot\text{сутки}^{-1}$	0,82	2,64	4,86	2,59	4,62	7,98	7,05	10,98	5,27	4,08	—
	т. N на все водохранилище в сутки	3,0	9,8	18,2	9,4	16,4	27,3	23,1	34,7	15,5	11,8	—

пересчитаны в килокалории на  $1 \text{ м}^2$  за месяц и сопоставлены с интенсивностью фотосинтеза под  $1 \text{ м}^2$  площади водоема за такое же время. Для этого график интенсивности фотосинтеза (валовая величина [5]) за летний период был разрезан по месяцам на части, которые были сопоставлены между собой по весу на аналитических весах. Это дало нам возможность определить  $\%$  использования фитопланктоном проникающей солнечной энергии в процессе фотосинтеза (табл. 13).

Таблица 14

**Эффективность использования фитопланктоном солнечной энергии  
в Рыбинском водохранилище в 1973 г.**

Показатели	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Суммарное и среднее
Проникающая в воду солнечная радиация, тыс. ккал/ $\text{м}^2$ за месяц	127	142	145	87	38	23	562
Интенсивность фотосинтеза, тыс. ккал $1 \text{ м}^2$ за месяц	0,216	0,212	0,660	0,610	0,57	0,48	1,803
Эффективность использования водорослями солнечной энергии, $\%$	0,17	0,15	0,45	0,70	0,15	0,21	0,32

С мая по октябрь включительно проникающая солнечная радиация колебалась в пределах 145 000—23 000 ккал на  $1 \text{ м}^2$  площади водоема за месяц, а интенсивность фотосинтеза от 660 до 48 ккал. В 1973 г. в мае и июне водорослями было использовано 0,17—0,15% солнечной энергии, затем ее использование усилилось и достигло 0,7% в августе, что для Рыбинского водохранилища представляет большую величину. В среднем за навигационный период эффективность использования водорослями проникающей в воду солнечной энергии равнялась 0,32%.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов С. И., Романенко В. И., Кузнецова Н. С. Численность бактерий, продукция и деструкция органического вещества в Рыбинском водохранилище в 1970 г. В кн.: Факторы формирования водных масс и районирование внутренних водоемов. 1974, Л., с. 95—112.
2. Кузнецов С. И., Романенко В. И., Кузнецова Н. С., Бакулина А. Г. Характеристика микробиологических процессов круговорота органического вещества в Рыбинском водохранилище в 1971 г. В кн.: Флора, фауна и микроорганизмы Волги. 1974, Рыбинск, с. 5—18.
3. Кузнецов С. И., Романенко В. И. и Кузнецова Н. С. Микробиологическая характеристика Рыбинского водохранилища в 1972 г. Наст. сборник.
4. Романенко В. И. Гетеротрофная ассимиляция  $\text{CO}_2$  бактериальной флоры воды. Микробиология, т. 33, в. 4, с. 679—683.
5. Романенко В. И. Сравнение кислородного и радиуглеродного методов определения интенсивности фотосинтеза фитопланктона. В кн.: Микрофлора, фитопланктон и высшая растительность внутренних водоемов. 1967, с. 64—66, Л.

6. Романенко В. И. Величины суточного и кратковременного фотосинтеза фитопланктона при определении с помощью  $^{14}\text{C}$ . Информ. бюлл. «Биология внутренних вод», 1970, № 5, с. 18—22.
7. Романенко В. И. и Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных водоемов. Л., 1974, с. 194.
8. Саралов А. И. Определение фиксации молекулярного азота в водной толще с помощью ацетиленового метода. — Информ. бюлл. «Биология внутренних вод», 1974, 25, с. 44—46.
9. Саралов А. И., Костяев В. Я. Действие света на фиксацию молекулярного азота водорослью *Naplosiphon fontinalis*. Информ. бюлл. «Биология внутренних вод», 1974, 25, с. 15—17.
10. Hardy R. W. F., Holsten R. D., Jackson E. K., Burris R. C: The acetylene-ethylene assay for  $\text{N}_2$  fixation: laboratory and field evaluation. — Plant. Physiol., 1968, v. 43, N 8, p. 1185—1207.
11. Keirn M. A., Brezonik R. W. Nitrogen fixation by bacteria in lake Mize. Florida and in some lacustrine sediments. — Limnol. Oceanogr., 1971, v. 16, N 5, p. 720—731.
12. Stewart W. D. P., Fietzgerald G. P. and Burris R. H. In situ studies on  $\text{N}_2$  fixation using the acetylene reduction technique. — Proc. Nat. Acad. Sci. U. S., 1967, v. 58, p. 2071—2078.

С. И. Кузнецов, В. И. Романенко, Н. С. Кузнецова, Н. С. Карпова

### Характеристика микробиологических и гидрологических процессов в Рыбинском водохранилище в 1974 г.

В 1974 г., как и в предыдущем, регулярные наблюдения над биологическими процессами в Рыбинском водохранилище проводились на 6 основных и 4 дополнительных станциях. Параллельно с биологическими параметрами определялась температура, прозрачность и электропроводность воды, а для расчета эффективности использования при фотосинтезе солнечной радиации были привлечены данные Рыбинской гидрометеорологической обсерватории.

Все анализы были произведены в пробах воды интегрированных по глубине эвфотической зоны — от поверхности до глубины тройной прозрачности воды по диску Секки.

Как и в предыдущие годы расчеты интенсивности биологических процессов за навигационный период произведены на основании анализов по 6 стандартным станциям. Отметим, что ранее [1] нами было показано, что эти станции хорошо характеризуют водоем в целом и конечный результат не зависит от числа станций.

Станции по акватории водохранилища располагались следующим образом: ст. 1 — Коприно, ст. 2 — у затопленного г. Мологи, ст. 5 — к юго-западу от Измайлова, ст. 6 — у Среднего Двора, ст. 7 — в центре водохранилища у затопленного с. Наволок, ст. 9 — к северо-востоку от с. Брейтова, ст. 10 — с. Противье у Дарвинского заповедника, ст. 11 — против с. Волково, ст. 12 — против с. Мякса, на бывшем русле реки Шексны, ст. 13 — в устье реки Суды. В 1974 г. наполнение водохранилища началось в апреле, а максимальный уровень воды наблюдался в середине июня и только на 10 см не достигал НПУ. В течение трех предшествующих лет уровень воды в водохранилище был весьма низок, но в 1974 г. он резко увеличился и держался почти на 2 м выше, чем в предыдущем

1973 г. (рис. 1). Максимальная площадь водохранилища в середине июня равнялась  $4605 \text{ км}^2$  и к концу года сократилась до  $3528 \text{ км}^2$ , соответственно менялись и объемы водохранилища от  $25,9$  до  $16,76 \text{ км}^3$ .

Водный баланс водохранилища представлен в табл. 1. Наибольшее количество воды  $12,393 \text{ км}^3$  поступило с боковой приточностью. Всего за 1974 г. в водохранилище поступило  $27,255 \text{ км}^3$ , а было сброшено через Рыбинский гидроузел  $20,218 \text{ км}^3$  воды. Если не учитывать атмосферные осадки и испарение с площади водохранилища, то водный баланс в 1974 г. был положительным и равнялся  $6,11 \text{ км}^3$ .

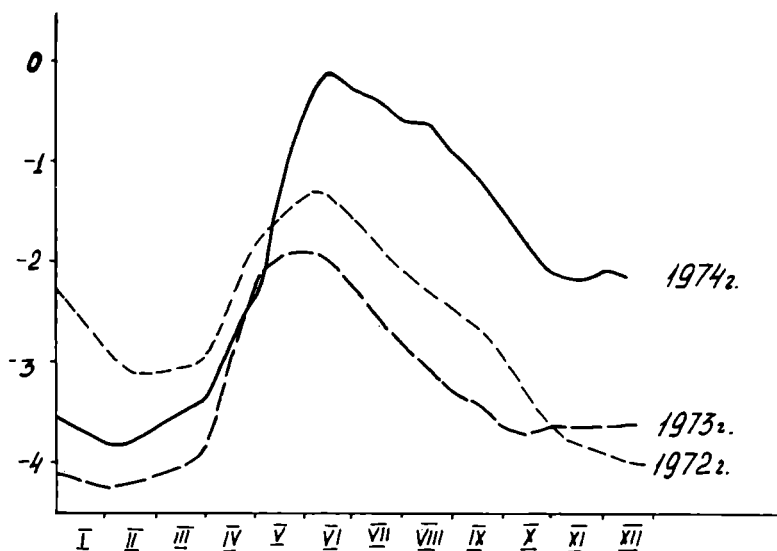


Рис. 1. Уровень воды в Рыбинском водохранилище в 1972, 1973 и 1974 г.  
По оси ординат — уровень воды относительно НПП в м., по оси абсцисс — месяцы

Водохранилище полностью очистилось от льда около 10 мая и во время первого рейса температура воды по всей акватории держалась в среднем около  $3^{\circ}\text{C}$ . Прогрев до  $8,1^{\circ}\text{C}$  наблюдался у Коприна, где шла волжская вода и до  $6,4^{\circ}\text{C}$  у Мологи. Наибольший прогрев воды наблюдался в середине июля — в среднем  $21,7$ , максимальная температура воды отмечена в районе Среднего Двора —  $23,3^{\circ}\text{C}$  (табл. 2).

Наибольшая прозрачность воды (табл. 2), как обычно, наблюдалась в середине июня — начале июля и достигала  $3,3$ — $3,5$  м по диску Секки в районе Измайлова и Среднего Двора. В августе, в связи с развитием фитопланктона прозрачность снизилась до  $1,5$  м и была такой до октября. В средней части водохранилища в начале мая наблюдалась наибольшая электропроводность  $233$ —

Таблица 1

Водный баланс Рыбинского водохранилища в 1974 г. (млн. м<sup>3</sup>)

Составляющие баланса	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Сумма за год
Приток через Угличский гидроузел	428	437	1119	1865	1702	826	821	353	159	141	360	387	8594
Приток через Шекснинский гидроузел	119	121	151	85	958	483	163	50	125	260	420	634	3569
Боковая приточность	141	226	288	3307	4501	991	423	478	246	298	683	702	12393
Осадки на зеркало водохранилища	49	74	34	75	399	102	465	418	142	210	232	195	2395
Приток за счет водообмена с грунтом	12	1	—	—	—	6	26	18	35	37	8	14	157
Сумма прихода	849	921	1663	5342	7560	2408	1907	1317	707	946	1703	1932	27255
Сток через Рыбинский гидроузел	1370	520	840	864	431	905	3247	2155	2597	3124	1804	2361	20218

Примечание: (—) — анализ не производился.



Температура (°С) и прозрачность воды по диску Секки (см) в Рыбинском водохранилище в 1974 г.

Номер и название станции	Показатель	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь		Ноябрь		Средняя
		13—14	28—29	12—13	27—28	15—18	18—20	4—6	23—24	10—14	24—25	2,9	215	2,2	160	
1. Коприно	температура	8,1	8,3	17	20,9	21,3	19,3	17,2	12,4	12	6,2	2,9	13,2			
	прозрачность	100	105	100	115	120	135	145	150	155	140	215	135			
2. Молога	температура	6,4	7,3	14,7	19,5	20,9	18,3	17,2	12	11,6	7	2,2	12,6			
	прозрачность	85	90	115	180	140	145	110	140	155	160	160	135			
5. Измайлово	температура	3,0	6,2	14,9	19,2	23,8	18,6	17,5	17,6	11	7,6	2,6	12,9			
	прозрачность	95	135	200	300	350	140	155	115	120	100	—	170			
6. Ср. Двор	температура	1,9	6,2	15,8	19,4	23,3	18,6	17,3	13	11,2	8	—	12,5			
	прозрачность	100	135	260	330	200	155	155	95	155	90	—	165			
7. Наволок	температура	2,8	6,7	15,8	18,8	20,4	18,6	17	12,6	11,7	8	2,2	12,2			
	прозрачность	65	75	225	320	250	160	170	100	130	90	—	160			
9. Брейтово	температура	3,7	7,0	15,5	19,6	20,4	17,8	17,3	12,4	11,4	6,8	3	12,3			
	прозрачность	125	100	165	260	185	—	100	120	160	90	140	145			
Средняя	температура	4,3	6,9	15,6	12,6	21,7	18,5	17,3	13,3	11,5	7,3	2,6	—			
Средняя	прозрачность	95	105	175	250	210	145	140	120	145	110	170	—			

Электропроводность воды в Рыбинском водохранилище в 1974 г. (мкСм)

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль	Август	Сентябрь		Октябрь		Средняя
	13—14	28—29	12—13	27—28	15—18	18—20	4—6	23—24	Октябрь		
									10—14	24—25	
1. Коприно	158	172	181	193	191	200	216	203	214	198	193
2. Молога	172	180	186	213	204	197	204	199	206	201	196
5. Измайлово	233	240	233	231	228	210	210	207	208	207	220
6. Ср. Двор	235	234	235	230	215	214	210	207	210	199	219
7. Наволок	277	245	236	222	221	211	206	208	205	211	224
9. Брейгово	236	192	201	183	197	197	203	200	206	214	203
Средняя	218	211	210	212	209	205	208	204	208	205	—

277 мкСм (табл. 3). Более мягкие воды отмечены на ст. 1 и 2, куда поступает волжская вода. Только в сентябре электропроводность ее выравнилась по всему водохранилищу, снизившись до 200 мкСм.

Продукция фитопланктона определялась с помощью радиоактивного изотопа  $^{14}\text{C}$ . При этом пробы воды экспонировались как при постоянном освещении 2500 лк в люминостате в течение 1 часа после внесения изотопа, так и на палубе судна при естественном освещении [4]. Продукция фитопланктона под 1 м<sup>2</sup> водоема была рассчитана исходя из суточной величины интенсивности фотосинтеза в интегрированных пробах воды и прозрачности ее по диску Секки (см. настоящий сборник, [2]).

Определение интенсивности фотосинтеза при стандартных условиях (табл. 4) позволило судить и об распределении фитопланктона по акватории водохранилища. Максимальное развитие водорослей наблюдалось в два периода — ранней весной, преимущественно в районе бывшего г. Мологи, и в августе — начале сентября в районе подтока волжских вод. В октябре, примерно при тех же температурах, что весной, фотосинтез и распределение живых водорослей снизилось почти в 10 раз. Величины продукции фитопланктона определялись на 10 станциях (табл. 5). Средние величины за отдельные рейсы близко совпадают между собой, что говорит о том, что 6 основных станций достаточно хорошо характеризуют продукцию органического вещества по своему водохранилищу.

Величины интенсивности фотосинтеза фитопланктона (табл. 5) в общем хорошо совпадают с фотосинтезом при стандартном освещении (табл. 4). Максимальные величины были отмечены в середине мая в районе Мологи (411) и начале июня у Коприна (522 мкг С/л·сутки<sup>-1</sup>). Во второй половине июня наблюдался спад в среднем до 80 мкг С/л·сутки<sup>-1</sup>, и вторая вспышка фотосинтеза началась в середине июля и достигала своего максимума в середине августа 245 мкг С/л·сутки<sup>-1</sup> или 0,6—0,64 г С/м<sup>2</sup>·сутки<sup>-1</sup>. В 1973 маловодном году, в это же время фотосинтез достигал 3,18 г С/м<sup>2</sup>·сутки<sup>-1</sup>, т. е. шел в 5 раз интенсивнее. В пересчете на все водохранилище с мая по сентябрь продукция органического вещества фитопланктона колебалась от 1000 до 2800 тонн С в сутки, резко снизилась во второй половине сентября до 240 т С/сутки и сошла на нет во второй половине октября.

Деструкция органического вещества в водохранилище в летний период определялась по снижению содержания кислорода в изолированном объеме воды после инкубации в течение суток в темноте при температуре водоема [5]. Пересчет от потребленного кислорода к углероду проводился путем умножения на коэффициент  $K=0,375 \times 0,8=0,3$ , где 0,375 — эквивалентные соотношения между  $\text{O}_2$  и С, а 0,8 — дыхательный коэффициент.

Максимальных величин деструкция органического вещества достигла в середине июня, когда наблюдался спад продукции фитопланктона (табл. 6) (рис. 2). Большие величины деструкции органического вещества были отмечены в районе Коприна и г. Мологи

Таблица 4

**Интенсивность фотосинтеза в Рыбинском водохранилище в 1974 г. при постоянном освещении проб воды «2500 лк» (мкг  $C/л \cdot час^{-1}$ )**

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль	Август	Сентябрь		Октябрь		Ноябрь	Средняя
	13—14	28—29	12—13	26—29			4—6	23—25	10—14	24—25		
1. Коприно	15,6	6,3	18,4	10,3	4,2	10,4	12,1	2,6	1,8	0,7	0,7	7,5
2. Молога	26,2	6,8	10,7	5,6	7,9	10,3	7,7	5,1	3,1	0,7	1,5	7,8
5. Измайлово	12,9	15,3	3,6	1,8	1,7	8,0	5,0	5,0	3,9	1,5	—	5,9
6. Ср. Двор	8,5	8,0	2,1	1,2	8,9	6,4	7,2	4,9	3,2	1,9	—	5,2
7. Наволок	11,6	5,9	1,7	1,4	5,4	4,7	4,4	4,5	3,1	1,0	4,7	4,5
9. Брейтово	5,8	8,5	3,9	5,3	8,7	—	8,9	2,6	4,1	5,1	2,4	5,5
Средняя	13,4	8,5	6,7	4,3	6,1	7,9	7,5	4,1	3,3	1,8	2,3	—

Интенсивность фотосинтеза в эвфлотической зоне Рыбинского водохранилища в 1974 г. ( $\text{мкг } C \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$ )

[illegible]

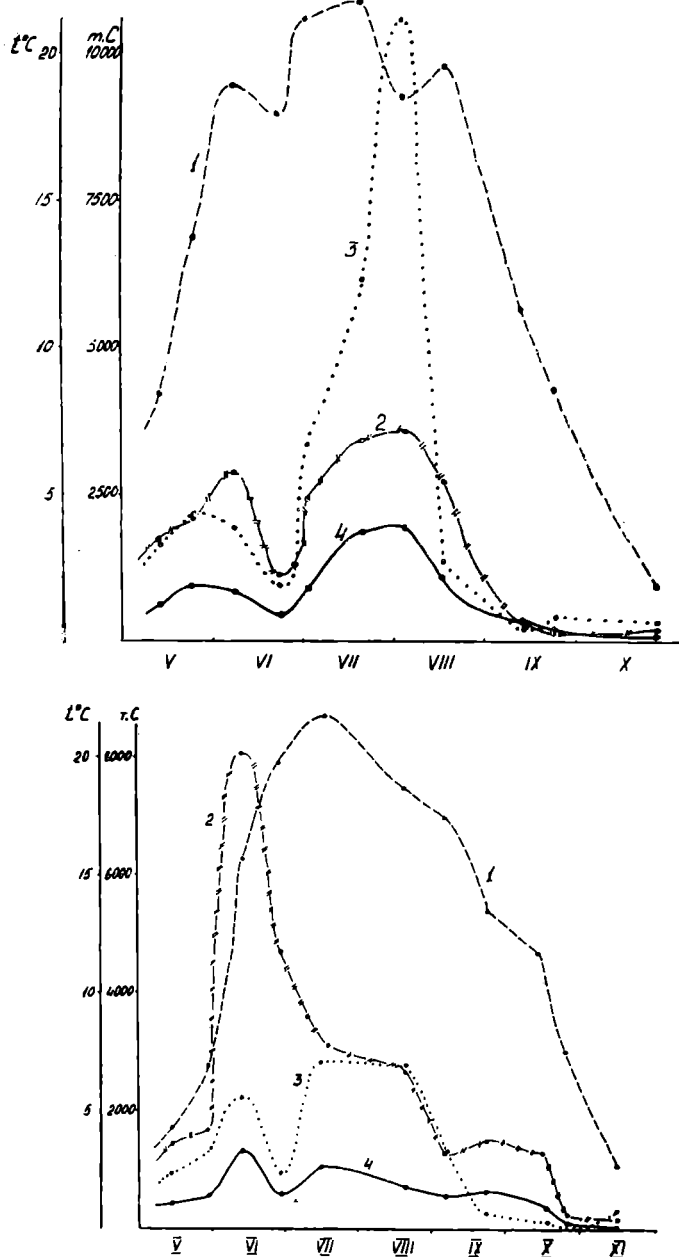


Рис. 2. Интенсивность биологических процессов (в расчете на весь водоем за сутки) и температуры воды в Рыбинском водохранилище в 1974 г.

По оси ординат, слева — температура воды (°C), справа — органическое вещество (т. С), по оси абсцисс — месяцы. 1 — температура воды, 2 — деструкция органического вещества, 3 — интенсивность фотосинтеза фитопланктона по  $^{14}\text{C}$ , 4 — продукция бактериальной биомассы

и соответствовали  $0,35 \text{ мг С/л} \cdot \text{сутки}^{-1}$  при интенсивности фотосинтеза  $0,52 \text{ мг С/л} \cdot \text{сутки}^{-1}$  (табл. 5).

Резкий спад деструкции наблюдался в конце октября, когда температура воды упала до  $6-7^\circ\text{C}$ , фотосинтез почти прекратился, а деструкции подверглись лишь растворенные в воде органические вещества и трудно разлагаемый детрит донных отложений.

Учет общей численности бактерий мы проводили микроскопическим методом на мембранных фильтрах [5]. В середине мая, еще при температуре воды около  $3^\circ\text{C}$ , был отмечен весенний максимум количества бактерий —  $3,28 \text{ млн/мл}$  (табл. 7). Высокая численность бактерий была и в открытой части водохранилища, куда, судя по величине электропроводности, еще не проникли воды половодья. Затем шло снижение общей численности бактерий до середины июля и новый подъем наблюдался в августе и сентябре при максимальном развитии фитопланктона. Интересно, что после трех маловодных лет, когда в 1973 г. в среднем численность бактерий упала до  $0,94 \text{ млн/мл}$ , в многоводном 1974 г. она вновь возросла до  $1,73 \text{ млн клеток в 1 мл}$ , при учете под световым микроскопом, при большом количестве форм обнаруживаемых только под электронным микроскопом [3].

Темновая ассимиляция углекислоты определялась изотопным методом. В склянку вносили 60 мл воды из водохранилища, добавляли 1 мл раствора  $\text{NaH}_2^{14}\text{CO}_3$  с активностью 1 млн. импульсов за 1 мин. и инкубировали в темноте 24 часа при температуре водоема. Бактерии отфильтровывали на мембранный фильтр и их активность определяли под счетчиком Гейгера. Количество карбонатов в воде определяли методом прямого титрования. Расчет темновой (гетеротрофной) ассимиляции  $\text{CO}_2$  производили по ранее описанной прописи [5]. Темновая ассимиляция в среднем колебалась от  $0,2$  до  $2,9 \text{ мкг С/л} \cdot \text{сутки}^{-1}$  (табл. 8), что близко совпадает с величинами ассимиляции углекислоты общей гетеротрофной микрофлорой воды водохранилища, т. е.  $6\%$  от величины суточной продукции бактериальной биомассы. Максимальная величина  $5,7 \text{ мкг С/л} \cdot \text{сутки}^{-1}$  была отмечена в июне в районе Коприна, что возможно было связано с окислением метана, выделяющегося из ила на бывшем русле Волги.

Если принять объем бактериальной клетки равным  $0,5 \text{ мк}^3$ , влажность  $80\%$ , то исходя из общей численности бактерий, можно рассчитать вес их сухой биомассы. Приняв, что при своем развитии на органических веществах бактерии Рыбинского водохранилища ассимилируют  $6\%$  углерода из  $\text{CO}_2$ , можно рассчитать их продукцию.

Время удвоения численности бактерий (табл. 9) рассчитывалось исходя из средней биомассы бактерий за каждый рейс по формуле

$$D = \frac{t \cdot \lg 2}{\lg(b_0 + P_0) - \lg b_0} \text{ часов}$$

где  $D$  — время удвоения в часах,  $t$  — длительность опыта в часах,  $b_0$  — исходная биомасса бактерий в 1 л в  $\text{мкг С/л}$ ,  $P_0$  — продукция бактериальной биомассы в  $\text{мкг С/л}$  за время  $t$  [5].

Таблица 6

Деструкция органического вещества в воде Рыбинского водохранилища в 1974 г. (мг  $O_2$ /л·сутки<sup>-1</sup>)

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль	Август	Сентябрь		Октябрь		Ноябрь	Средняя
	13—14	28—29	12—13	27—28	18—18	18—20	4—6	23—24	10—14	24—25	14—15	
1. Коприно	0,16	0,16	1,19	1,04	0,44	0,40	0,09	0,03	0,09	0,06	0,03	0,34
2. Молога	0,19	0,18	0,99	0,85	0,44	0,15	0,15	0	0,14	0,03	0,02	0,28
5. Измайлово	0,21	0,21	0,78	0,31	0,16	0,31	0,19	0,22	0,35	0,05	—	0,28
6. Ср. Двор	0,19	0,19	0,69	0,09	0,63	0,25	0	0,22	0,20	0,03	—	0,25
7. Наволок	0,24	0,15	0,66	0,13	0,13	0,19	0,22	0,46	0,14	0,07	0,06	0,22
9. Брейтово	0,19	0,17	0,62	0,28	0,35	0,31	0,25	—	0,13	0,02	0,01	0,23
Средняя	0,19	0,18	0,82	0,45	0,36	0,27	0,15	0,19	0,18	0,04	0,03	—

Таблица 7

## Общее количество бактерий и время удвоения их численности в воде Рыбинского водохранилища в 1974 г. (млн/мл)

Номер и название станции	Май		Июнь		Август	Сентябрь		Октябрь		Ноябрь		Среднее
	13-14	23-29	12-13	27-28		15-18	4-6	23-24	10-14	24-25	14-15	
1. Коприно	5,17	1,86	1,69	2,30	1,42	1,34	1,46	1,28	1,46	1,17	1,62	1,89
2. Молога	2,87	2,13	2,07	1,20	2,45	1,79	2,66	1,34	0,71	1,02	1,76	1,81
3. Измайлово	3,24	0,95	2,14	1,56	1,22	1,68	1,83	1,86	1,30	1,39	—	1,72
4. Ср. Двор	1,77	1,43	2,06	1,10	1,70	1,07	1,98	1,19	1,52	1,14	—	1,50
5. Наволок	4,60	3,01	1,74	1,41	1,86	1,17	1,68	2,50	0,85	1,42	0,75	1,91
6. Брейтово	2,06	1,65	1,19	1,61	1,76	1,48	2,20	1,06	1,34	1,63	0,88	1,53
Среднее	3,28	1,84	1,81	1,53	1,73	1,42	1,96	1,54	1,19	1,29	1,25	—
Среднее время удвоения численности бактерий, час.	102	65	31	41	40	29	54	37	42	157	240	

Примечание: среднее количество бактерий — 1,73 млн/мл, время удвоения численности — 76 час.



Таблица 8  
Темновая ассимиляция  $\text{CO}_2$  микрофлорной воды в Рыбинском водохранилище в 1974 г. ( $\text{мг C/l} \cdot \text{сутки}^{-1}$ )

Номер и название станции	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь		Ноябрь		Средняя
	13-14	28-29	12-13	27-28	15-18	18-20	4-6	23-24	10-14	21-25	14-15				
1. Коприно	1,12	1,09	5,70	2,96	4,41	2,14	1,04	2,93	0,65	0,41	0,19	2,06			
2. Молога	1,36	1,24	3,30	1,88	2,76	2,05	1,97	2,81	0,96	0,20	0,11	1,79			
5. Измайлово	1,46	1,49	4,50	0,54	1,60	1,63	1,94	1,37	2,44	0,36	—	1,73			
6. Ср. Двор	1,35	1,37	1,22	0,93	3,48	1,87	1,81	1,96	1,39	0,22	—	1,56			
7. Наволок	1,67	1,05	0,79	0,84	1,13	1,18	1,17	0,87	0,97	0,51	0,40	0,96			
9. Брейтово	1,33	1,22	1,82	1,05	1,70	—	—	1,83	1,20	0,16	0,09	1,14			
Средняя	1,38	1,24	2,89	1,35	2,51	1,97	1,59	1,96	1,27	0,31	0,20	—			

Таблица 9  
Продукция и деструкция органического вещества в Рыбинском водохранилище в 1974 г.

Показатели	Май		Июнь		Июль		Август		Сентябрь		Октябрь		Ноябрь
	13-14	28-28	12-13	26-29	15-18	18-20	4-6	23-25	10-14	21-25	14-15		
Площадь водохранилища, км <sup>2</sup>	3973	4430	4605	4572	4480	4257	4185	3980	3753	3685	3577		
Продукция фитопланктона	0,30	0,29	0,48	0,21	0,64	0,60	0,30	0,06	0,05	0,006	0,09		
т С на весь водоем/сутки	1190	1280	2210	960	2890	2690	1250	240	187	22	320		
Объем водохранилища км <sup>3</sup>	20,47	24,39	25,90	25,61	24,82	22,90	22,28	20,52	18,60	17,14	16,76		
Деструкция органического вещества в воде	0,071	0,068	0,310	0,169	0,135	0,101	0,056	0,071	0,068	0,015	0,011		
Продукция бактерий	1453	1659	8029	4328	3351	2313	1248	1457	1265	261	188		
т С на весь водоем/сутки	23,0	20,7	48,3	22,5	41,9	32,9	26,6	32,7	21,2	5,2	3 3		
	471	505	1251	576	1040	753	593	670	394	94	57		

Наиболее быстро удвоение числа бактерий происходило в середине июля и для всех станций в среднем равнялось 29 часам. В конце июня оно повысилось до 40 часов, а в течение летнего сезона колебалось в пределах от 30 до 65 часов. Сравнивая время удвоения числа бактерий в 1973 и 1974 гг., можно сказать, что размножение бактерий в 1974 г. шло вдвое медленнее, чем в предыдущем году.

Полученные материалы позволили сделать пересчет продукции и деструкции органического вещества на все водохранилище. Продукция фитопланктона за 200 дней равнялась 250 000 т С на все водохранилище и была в этом году почти вдвое меньше, чем в предыдущем. В противоположность этому деструкция на весь водоем равнялась 499 000 т и была заметно больше, чем в маловодном 1973 г. Продукция биомассы бактерий равнялась 127 000 т и почти совпадала с продукцией предыдущего года (табл. 10).

Данные Рыбинской гидрометеорологической обсерватории по солнечной радиации в районе водохранилища за вегетационный период были использованы для определения использования солнечной радиации развивающимся фитопланктоном (табл. 11).

Таблица 10

Суммарные величины продукции и деструкция органического вещества в Рыбинском водохранилище за 200 дней в 1974 г.

Продукция фитопланктона	250 000 т. С — 60 г С/м <sup>2</sup>
Деструкция органического вещества	499 000 т. С — 121 г С/м <sup>2</sup>
Продукция бактериальной биомассы	127 000 т. С — 30 г С/м <sup>2</sup>

Таблица 11

Эффективность использования солнечной энергии фитопланктоном в Рыбинском водохранилище

Месяцы	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Сумма
Проникающая солнечная радиация, тыс. ккал/м <sup>2</sup>	88	145	126	98	73	22	552
Продукция фитопланктона, тыс. ккал/м <sup>2</sup>	0,117	0,160	0,204	0,242	0,083	0,017	0,823
Эффективность использования фитопланктоном солнечной энергии, %	0,13	0,11	0,16	0,25	0,11	0,08	0,15 средн

Максимальная проникающая солнечная радиация была в июне и равнялась 145 000 ккал/м<sup>2</sup> и только 0,11% этой энергии было использовано в процессе фотосинтеза фитопланктоном. Наиболее эффективно она использовалась в августе — 0,25%, что совпадало с наибольшей продукцией фитопланктона.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов С. И., Романенко В. И., Кузнецова Н. С. Численность бактерий, продукция и деструкция органического вещества в Рыбинском водохранилище в 1970 г. В кн.: Факторы формирования водных масс и районирование внутренних водоемов, 1974, Л., с. 95—112.
2. Кузнецов С. И., Романенко В. И., Кузнецова Н. С. Микробиологическая характеристика Рыбинского водохранилища в 1972 г. (настоящий сборник).
3. Лаптева Н. А. Электронно-микроскопическое изучение микрофлоры Рыбинского водохранилища. Микробиология, 1976, т. 45, в. 3, с. 547—551.
4. Романенко В. И. Величины суточного и кратковременного фотосинтеза фитопланктона при определении с помощью  $^{14}\text{C}$ . Информ. бюлл. «Биология внутренних вод», 1970, № 5, с. 18—22.
5. Романенко В. И. и Кузнецов С. И. Экология микроорганизмов пресных водоемов, 1974, Л., 194 с.

УДК 556.555.4/5

**Тепловой баланс Иваньковского водохранилища и его изменение в зоне подгрева.** Курдина Т. Н. В кн.: Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 36(39), 1977, Борок, с.

Тепловой баланс рассчитан за май-октябрь для естественных условий и подгреваемой части водоема. Поглощенная водой солнечная радиация дает около 57 ккал/см<sup>2</sup>, тепловой сток рек — 15 ккал/см<sup>2</sup>, вместе оба источника дают более 98% естественного теплопритока. Сумма теплопотерь на испарение, эффективное излучение, турбулентный теплообмен составляет 59 ккал/см<sup>2</sup>; вынос тепла с водами — 14 ккал/см<sup>2</sup>; всего по данным статьям расходуется 96,5% поступившего тепла. Подогретые воды ГРЭС увеличивают теплоприток в приплотинной части водоема в среднем на 11%. Табл. — 6, библиограф. — 21 назв.

УДК 556.556.2

**О структуре течений в верхневолжских водохранилищах.** Литвинов А. С. В кн.: Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 36(39), 1977, Борок, с.

По материалам наблюдений на Иваньковском и Рыбинском водохранилищах показано, что среднесуточные скорости течения, характеризующие перенос вод, как в зимний, так и в летний период значительно меньше мгновенных скоростей. Основная часть энергии пульсаций скорости заключена в крупномасштабных вихревых образованиях, анизотропных в пространстве. Анизотропия крупномасштабных вихрей приводит к анизотропии коэффициентов горизонтального макрообмена. При горизонтальных масштабах менее 100 м коэффициенты обмена становятся изотропными. В водохранилищах наблюдается большая изменчивость среднесуточных значений коэффициентов обмена. Илл. — 5, табл. — 5, библиограф. — 9 назв.

УДК 556.161/165.2.5.2

**Исследование связи стока рек с атмосферными осадками.** Кондрацова О. Ф. В кн.: Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 36(39), 1977, Борок, с.

Рассмотрена зависимость среднегодового стока 12 рек ЕТС от атмосферных осадков. Работа выполнена с помощью метода разложения полей стока и осадков по естественным ортогональным функциям и взаимокорреляционного анализа. Установлены характер многолетних колебаний рассматриваемых элементов, общие черты между ними и коэффициенты связи. Илл. — 2, табл. — 3, библиограф. — 12 назв.

УДК 556.555.6

**Влияние верхневолжских водохранилищ на состав стока взвешенных веществ.** Волги. Зиминова Н. А. В кн.: Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 36(39), 1977, Борок, с.

Сопоставляется содержание углерода, азота и фосфора во взвешенных веществах на входных и замыкающем створах Иваньковского, Угличского, Рыбинского водохранилищ. На протяжении каскада водохранилищ средняя годовая концентрация органического углерода и азота во взвесах возрастает в 2 раза в сравнении с незарегулированным участком реки. Концентрация общего фосфора во взвесах возрастает под влиянием Иваньковского водохранилища более чем в 2 раза, а затем в Рыбинском водохранилище вновь снижается до значений, наблюдаемых в речных взвесах. Основными механизмами трансформации состава стока взвешенных веществ являются седиментация части речных взвесей и образование автотонных (трансседиментационных и биотических) взвесей. Изменения в составе стока взвешенных веществ сопровождаются снижением содержания взвешенной формы углерода и азота в воде в 2 раза, фосфора — в 5 раз. Табл. — 7, библиограф. — 16 назв.

**Исследования оборачиваемости фосфатов в водной толще водохранилищ.** Былинкина А. А. В кн.: Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 36(39), 1977, Борок, с.

С применением  $^{32}\text{P}$  определены время и скорость оборота фосфатов в верхне-волжских водохранилищах, различающихся по степени трофии. Рассмотрены сезонные изменения этих показателей. Проведено сопоставление количества фосфатов, участвующих в процессах биотического обмена, с содержанием фосфора в продуцируемой биомассе. Последняя величина значительно превосходит поступление валового фосфора с речным стоком. Илл. — 5, табл. 12, библи. — 30 назв.

УДК 556.551.14

**О влиянии донных отложений на содержание биогенных элементов в воде.** Трифонова Н. А., Былинкина А. А. В кн.: Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 36(39), 1977, Борок, с.

В Ивановском и Угличском водохранилище изучалось послойное распределение биогенных элементов (N, Fe, P, Mn) в илах и поровых растворах. Определялось выделение аммонийного азота и фосфатов в экспериментальных условиях. Проведено сопоставление полученных данных с результатами расчета концентрационной диффузии этих элементов. Изучалось изменение содержания фосфатов в воде при переходе тонкодисперсной части донных отложений во взвешенное состояние. Илл. — 2, табл. — 9, библи. — 30 назв.

УДК 546.31:627.81

**Натрий и калий в илах волжских водохранилищ.** Кудрявцева Н. А. В кн.: Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 36(39), 1977, Борок, с.

Проведены определения натрия и калия в илах и тонкодисперсной фракции иловых отложений Ивановского, Угличского, Рыбинского, Горьковского и Куйбышевского водохранилищ. Илы глубоководной части волжских водохранилищ (серые и песчанистые илы) характеризуются довольно стабильным содержанием щелочных металлов: натрия в среднем содержалось  $0,75 \pm 0,02\%$ , калия —  $2,07 \pm 0,15\%$  от прокаленного остатка, в тонкодисперсной фракции ила содержание исследуемых катионов несколько выше. Илл. — 1, табл. — 4, библи. — 23 назв.

УДК 556.535.8:547.914

**Исследование продуктов конденсации органических веществ, образующихся в водоемах с участием фенола.** Синельников В. Е., Шитиков В. К. В кн.: Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Труды Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 36(39), 1977, Борок, с.

Исследовали условия образования продуктов конденсации фенолов с альдегидами в лабораторных условиях, в аквариумах и в донных отложениях рек. Процесс конденсации при низких концентрациях реагирующих веществ и при температуре  $18-20^\circ\text{C}$  развивается очень медленно и требует большой длительности опыта. В аквариумах этот процесс проходил при дефиците  $\text{O}_2$  и при недостатке азота и фосфора. Илл. — 2, табл. — 11, библи. — 17 назв.

УДК 541.144.7

**Микробиологическая характеристика Рыбинского водохранилища в 1972 г.** Кузнецов С. И., Романенко В. И. и Кузнецова Н. С. В кн.: Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 36(39), 1977, Борок, с.

В 1972 г. Рыбинское водохранилище отличалось низким уровнем после нескольких многоводных вод. Во время половодья уровень воды был ниже НПГ на 1,5 м. За год в водохранилище поступило  $15,68 \text{ км}^3$  воды, а через гидроузел было сброшено  $19,42 \text{ км}^3$ , водный баланс был отрицательным и равнялся —  $3,74 \text{ км}^3$ . За вегетационный период с мая по ноябрь средняя прозрачность воды равнялась 146 см, продукция фитопланктона по  $1 \text{ м}^2$  равна  $127 \text{ г С}$ , что соответствовало использованию  $0,25\%$  общей проникающей солнечной радиации. Соответственно разрушения органического вещества в толще воды равнялась  $153 \text{ г С}$  под  $\text{м}^2$ .

Численность бактерий в среднем составляла 1,76 млн в 1 мл, темновая ассимиляция  $\text{CO}_2$  равнялась 2,18 г С, а продукция бактериальной биомассы 36,3 г С под 1 м<sup>2</sup>. Илл. — 3, табл. — 15, библ. — 12 назв.

УДК.541.144.7

**Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества и фиксации молекулярного азота в Рыбинском водохранилище в 1973 г.** Кузнецов С. И., Романенко В. И., Кузнецова Н. С. и Саралов А. И. В кн.: Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 36(39), 1977. Борок, с.

В 1973 г. в Рыбинском водохранилище второй год подряд наблюдался относительно низкий уровень воды. Во время половодья уровень воды был ниже НПП на 1,7 м. За год в водохранилище поступило 18,26 км<sup>3</sup>, а через гидроузел было сброшено 14,59 км<sup>3</sup>, водный баланс был положительным и равнялся +3,7 км<sup>3</sup>. За вегетационный период, с мая по ноябрь, средняя прозрачность воды по диску Секки равнялась 143 см, продукция фитопланктона под 1 м<sup>2</sup> — 129 г С, что соответствовало использованию 0,32% общей проникающей солнечной радиации. Соответственно деструкция органического вещества в толще воды равнялась 94 г С под 1 м<sup>2</sup>. Общая численность бактерий в среднем составляла 1,73 млн. в 1 мл, темновая ассимиляция  $\text{CO}_2$  — 2,52 г С, а продукция биомассы бактерий — 42 г С под 1 м<sup>2</sup>. Фиксация свободного азота синезелеными водорослями и бактериями равнялась в водной массе 0,5 г N<sub>2</sub>, а в иловых отложениях 0,4 г под 1 м<sup>2</sup>. Илл. — 1, табл. — 13, библ. — 12 назв.

УДК 541.144.7

**Характеристика микробиологических и гидрологических процессов в Рыбинском водохранилище в 1974 г.** Кузнецов С. И., Романенко В. И., Кузнецова Н. С. и Карпова Н. С. В кн.: Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 36(39). 1977, Борок, с.

Уровень воды в Рыбинском водохранилище в 1974 г. был близок к нормальному. За год в водохранилище поступило 27,26 км<sup>3</sup>, а через гидроузел сброшено 20,22 км<sup>3</sup> воды, водный баланс был положительным и равнялся +6,11 км<sup>3</sup>. За вегетационный период с мая по ноябрь средняя прозрачность воды по диску Секки равнялась 154 см, продукция фитопланктона под 1 м<sup>2</sup> была равна 60 г С, что соответствовало использованию 0,15% общей проникающей солнечной радиации. Соответственно деструкция органического вещества в толще воды равнялась 121 г С под 1 м<sup>2</sup>. Общая численность бактерий в среднем возросла вновь до 1,73 млн в 1 мл, темновая ассимиляция  $\text{CO}_2$  равнялась 1,80 г С м<sup>2</sup>, а продукция биомассы бактерий 30 г С под 1 м<sup>2</sup>. Илл. — 1, табл. — 10, библ. — 5 назв.

# СОДЕРЖАНИЕ

Т. Н. Курдина. Тепловой баланс Иваньковского водохранилища и его изменение в зоне подогрева . . . . .	3
А. С. Литвинов. О структуре течений в верхневолжских водохранилищах . . . . .	18
О. Ф. Кондрацова. Исследование связи стока рек с атмосферными осадками . . . . .	30
Н. А. Зиминова. Влияние верхневолжских водохранилищ на состав стока взвешенных веществ Волги . . . . .	38
А. А. Былинкина. Исследование оборачиваемости фосфатов в водной толще водохранилищ . . . . .	53
Н. А. Трифонова, А. А. Былинкина. О влиянии донных отложений на содержание биогенных элементов в воде . . . . .	74
Н. А. Кудрявцева. Натрий и калий в илах волжских водохранилищ . . . . .	91
В. Е. Синельников, В. К. Шитиков. Исследование продуктов конденсации органических веществ, образующихся в водоемах с участием фенола . . . . .	99
С. И. Кузнецов, В. И. Романенко и Н. С. Кузнецова. Микробиологическая характеристика Рыбинского водохранилища в 1972 г. . . . .	114
С. И. Кузнецов, В. И. Романенко, Н. С. Кузнецова и А. И. Саралов. Микробиологические процессы продукции и деструкции органического вещества и фиксация молекулярного азота в Рыбинском водохранилище в 1973 г. . . . .	131
С. И. Кузнецов, В. И. Романенко, Н. С. Кузнецова, Н. С. Карпова. Характеристика микробиологических и гидрологических процессов в Рыбинском водохранилище в 1974 г. . . . .	149
Рефераты . . . . .	163

# CONTENTS

T. N. Kurdina. Heat budget of the Ivankovo reservoir and its change in the heated area. . . . .	3
A. S. Litvinov. Structure of currents in the Upper Volga reservoirs. . . . .	18
O. F. Kondratsova. Investigation of rainfall-runoff relation. . . . .	30
N. A. Ziminova. The Upper Volga reservoirs impact on the composition of the Volga suspended sediments yield . . . . .	38
A. A. Bylinkina. Studies of phosphate turnover in the reservoirs water. . . . .	53
N. A. Trifonova, A. A. Bylinkina. Bottom sediments influence on the nutrients content in water . . . . .	74
N. A. Kudrjavitseva. Sodium and potassium in the Volga reservoirs muds. . . . .	91
V. E. Sineľnikov, V. K. Shitikov. Study of organic matters condensation products, forming with phenol participation in waterbodies. . . . .	99
S. I. Kuznetsov, V. I. Romanenko, N. S. Kuznetsova. Microbiological characteristic of the Rybinsk reservoir in 1972. . . . .	114
S. I. Kuznetsov, V. I. Romanenko, N. S. Kuznetsova, A. I. Saralov: Microbiological processes of organic matter production and destruction and molecular nitrogen fixation in the Rybinsk reservoir in 1973. . . . .	131
S. I. Kuznetsov, V. I. Romanenko, N. S. Kuznetsova, N. S. Karpova. Characteristic of microbiological and hydrological processes in the Rybinsk reservoir in 1974. : : : : : . . . . .	149