

06
БВВ

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

23/26

Броч
м/с

ОРГАНИЧЕСКОЕ
ВЕЩЕСТВО
И ЭЛЕМЕНТЫ
ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО
РЕЖИМА
ВОЛЖСКИХ
ВОДОХРАНИЛИЩ

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО
И ЭЛЕМЕНТЫ
ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА
ВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

2073/—n



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Л Е Н И Н Г Р А Д · 1972

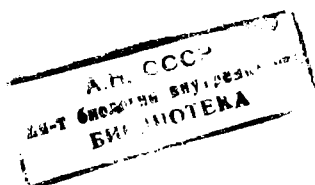
INSTITUTE OF THE BIOLOGY OF INLAND WATERS
OF THE ACADEMY OF SCIENCES OF THE USSR

ORGANIC MATTER
AND ELEMENTS
OF HYDROLOGICAL REGIME
IN THE RESERVOIRS
OF THE VOLGA

Главный редактор
докт. геогр. наук *Н. В. Буторин*

Редактор издания
докт. биол. наук *Б. К. Штегман*

2-10-4
727-72



**ФОТОСИНТЕЗ, ДЕСТРУКЦИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА
И ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ БАКТЕРИЙ
В РЫБИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ В 1968 г.**

Микробиологические наблюдения на Рыбинском водохранилище ведутся в стандартных рейсах начиная с 1954 г. Первоначально учитывалась лишь численность бактерий, но постепенно количество анализов увеличивалось и в 1968 г. кроме общей численности бактерий определялись продукция органического вещества, образующегося в процессе фотосинтеза фитопланктона, деструкция органического вещества, продукция бактериальной биомассы, время генерации бактерий и т. д.

Пробы воды отбирались в следующих пунктах: ст. 1 — у сел. Коприна, ст. 2 — у затопленного г. Мологи, ст. 5 — к юго-западу от дер. Измайлово, ст. 6 — у дер. Средний Двор, ст. 7 — в центре водохранилища у затопленной дер. Наволок, ст. 9 — к северо-востоку от сел. Брейтова. (В таблицах приводится указанная нумерация станций).

Ввиду того что в Рыбинском водохранилище повсеместно происходит перемешивание воды до самого дна, пробы отбирались лишь из поверхностного слоя и принималось, что анализы соответствуют всей толще воды.

Общее количество бактерий учитывалось по методу А. С. Разумова (1947) на мембранных фильтрах под микроскопом МБИ-3 при объективе $\times 90$ и окуляре $\times 10$, собственное увеличение насадки $\times 1.5$. Вероятная ошибка подсчета не превышала 10%. При подсчете тех же препаратов под микроскопом Nf-Люмипан с окуляром $\times 12.5$ и объективом $\times 100$ учитывалось значительно большее количество микроорганизмов, в частности более мелкие формы, которые не видны под микроскопом МБИ-3. Таким образом, при сравнении численности бактерий в различных водоемах необходимо принимать во внимание увеличение и разрешающую способность микроскопов. Приведенные нами результаты сравнимы с данными подсчета численности микроорганизмов в предыдущие годы, поскольку учет все время производился под микроскопом МБИ-3.

Фотосинтез фитопланктона определялся изотопным методом (Кузнецов и Романенко, 1963), продукция биомассы бактерий рассчитывалась на основании определения гетеротрофной ассимиляции углекислоты (Романенко, 1964). Деструкция органического вещества в воде определялась кислородным методом (Винберг, 1934) и пересчитывалась на весь столб воды. При переходе от кислорода к углероду дыхательный коэффициент был принят нами за единицу. Деструкция в илах определялась по методу М. Е. Гамбаряна (1962) в модификации В. И. Романенко и В. А. Романенко (1969) — по поглощению кислорода в определенном объеме воды

в стеклянной трубке над монолитом ила. Полученные результаты выражались в углероде на площадь дна в 1 м^2 .

Колебания уровня воды в Рыбинском водохранилище в 1968 г. почти полностью совпадали с колебаниями в 1967 г. (рис. 1) — оба года были многоводными. Таким образом, большого поступления органического вещества в водохранилище с осушаемой территории не наблюдалось.

Данные по колебанию температуры и прозрачности воды представлены в табл. 1, из которой видно, что в общем год был холодный, относительно более теплыми были июнь, август и сентябрь, в середине лета (в июле) было холодно. В связи со слабым развитием фитопланктона наибольшая прозрачность воды отмечалась в июле и сентябре — в ряде пунктов она достигала $1.5\text{--}2.3 \text{ м}$.

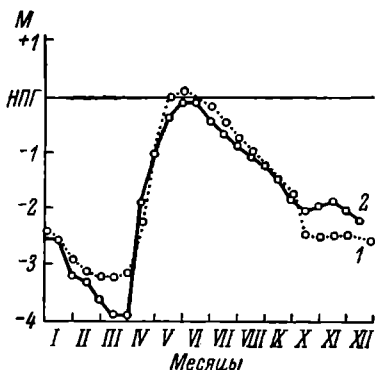


Рис. 1. Колебания уровня воды в водохранилище в 1967 (1) и в 1968 гг. (2).

Содержание растворенного кислорода в Рыбинском водохранилище указывает на хорошие условия аэрации в водоеме. Об этом можно судить на основании анализов растворенного кислорода в поверхностном слое воды. Вследствие большой площади и малых глубин вертикальное перемешивание воды идет по всей акватории до дна, поэтому содержание растворенного кислорода в поверхностном слое и у дна почти совпадает.

Как известно, содержание растворенного кислорода есть результирующая трех процессов: растворения его из воздуха или, наоборот, выделения в свободном виде в процессе фотосинтеза и потребления его микроорганизмами, что сопро-

вождается деструкцией растворенного и взвешенного органического вещества.

Кислородный режим Рыбинского водохранилища в течение вегетационного периода был весьма благоприятным (табл. 2). Содержание растворенного кислорода не падало ниже 6.96 мг/л . В мае насыщение воды кислородом достигало в среднем $88\text{--}90\%$ от полного насыщения; в июле, когда первичная продукция органического вещества снизилась, наблюдался наиболее низкий процент насыщения. В августе и первой половине сентября при усилении фотосинтеза насыщение воды кислородом возросло соответственно до 94 и 120% . Осенью при снижении процессов деструкции и фотосинтеза насыщенность воды кислородом достигала 90% и, наконец, в ноябре при температуре, близкой к нулю, вновь увеличилась до 100% и наблюдалось равновесие между растворенным в воде кислородом и содержащимся в воздухе.

Содержание растворенного кислорода ниже 100% насыщения в течение летнего периода указывает на интенсивно проходившие процессы деструкции органического вещества.

Максимальный фотосинтез (табл. 3) наблюдался в Волжском плесе водохранилища в конце мая, в августе и первой половине сентября, достигая 0.3 мг С/л в сутки. Примерно такие же величины отмечались в августе и в западной части водохранилища в районе сел. Брейтова. К началу ноября фотосинтез практически прекратился и суточная продукция органического вещества выражалась тысячными долями мг С/л .

Деструкция органического вещества в водной массе представлена в табл. 4. Наибольшей величины она достигала в августе и сентябре и была, как правило, больше продукции органического вещества. Ее максимальные значения соответствовали во времени тем районам, где наблю-

Прозрачность воды по диску Секки (см), глубина (м) и температура воды (°С)

Номер станции	Показатель	23 IV	6 V	28 V	12 VI	27 VI	16 VII	1 VIII	4 IX	23 IX	8 X	1 XI	Среднее
1	Прозрачность . . .	90	105	110	100	110	115	—	80	140	160	100	113
	Глубина	14	45	14	45	14	13	13	14	14	14	13.5	14
	Температура . . .	4.6	7.2	11.5	16.2	20.3	17.4	—	18.3	21	11.0	4.6	12.0
2	Прозрачность . . .	80	100	100	—	125	170	—	80	140	130	120	115
	Глубина	16	15	16.5	14.5	13.5	14	14	15.5	14	15	13.8	12
	Температура . . .	2.0	6.1	11.0	15.5	20.4	17.3	—	18.0	20.4	9.4	4.4	11.3
5	Прозрачность . . .	—	110	70	100	200	50	—	100	200	100	50	110
	Глубина	—	9	8.5	10.0	10.0	8.5	10	8	8	8	40	90
	Температура . . .	—	3.5	10.5	15.0	20.7	17.2	—	17.8	22.4	10.2	3.2	17.4
6	Прозрачность . . .	—	110	165	110	200	150	—	100	230	100	70	134
	Глубина	—	42	14	40	10	11	6	10.5	12	9.0	10	10
	Температура . . .	—	4.9	10	15	20.2	16.8	—	18.3	21.8	9.8	4.0	12.1
7	Прозрачность . . .	—	130	150	110	125	90	—	110	190	90	110	116
	Глубина	—	9	8	8	10.5	9	6	8	7	10	8	8.5
	Температура . . .	—	4.9	11	14.8	20.4	16.6	—	—	—	—	3.9	—
9	Прозрачность . . .	—	110	150	100	230	145	—	130	200	150	80	144
	Глубина	—	9.3	9	10.5	11	9	10	9	8.5	8	9	9.0
	Температура . . .	—	5.0	11	14.5	19.5	16.9	—	18.3	19.5	9.2	4.0	11.8
Средняя	Прозрачность . .	90	111	124	104	165	120	—	102	183	121	90	—
	Глубина	15	11	11	11	11	11	11	11	10.5	11	11	—
	Температура . .	3.3	5.3	10.8	15.2	20.2	17.0	—	17.9	21.0	9.9	4.0	0.28

Содержание кислорода (мг/л) и насыщенность им воды (%)

Номер станции	Показатель	6 V	29 V	12 VI	26 VI	16 VII	1 VIII	19 VIII	4 IX	23 IX	8 X	1 XI	Среднее
1	O ₂	10.48	9.45	7.71	7.55	7.69	8.87	8.61	6.96	9.98	12.60	15.19	9.55
	% насыщения	83.5	85.0	76.6	80.7	78.0	—	90.8	75.5	89.0	96.7	103.3	85.9
2	O ₂	11.27	9.99	8.42	8.42	8.37	8.99	9.48	8.21	10.51	12.26	9.98	9.63
	% насыщения	91.3	88.7	82.0	72.6	85.0	—	96.0	88.0	90.7	93.6	87.2	87.5
5	O ₂	11.49	10.14	9.36	8.49	7.79	9.18	8.64	9.05	10.76	11.61	—	9.65
	% насыщения	85.7	89.5	90.5	91.4	79.3	—	90.0	100.5	89.0	86.3	—	89.2
6	O ₂	11.56	10.86	8.95	8.42	8.19	9.08	9.67	8.61	10.20	11.82	—	9.74
	% насыщения	89.5	94.5	86.5	90.0	82.3	—	100.0	94.9	90.0	89.4	—	90.8
7	O ₂	11.56	10.11	8.42	8.33	8.13	8.93	9.17	11.08	10.61	11.70	—	9.80
	% насыщения	89.5	90.0	83.0	89.2	81.2	—	95.0	120.2	89.0	88.4	—	91.7
9	O ₂	11.34	10.64	8.89	8.42	8.25	9.36	9.11	8.61	10.29	11.82	14.66	10.13
	% насыщения	88.3	94.7	85.0	89.0	84.5	—	95.0	91.5	90.0	89.4	100.2	90.7
Среднее	O ₂	11.28	10.19	8.62	8.27	8.07	9.07	9.11	8.75	10.39	11.97	13.27	—
	% насыщения	87.9	90.5	83.9	85.5	81.7	—	94.5	95.1	89.3	90.6	96.9	—

Интенсивность фотосинтеза водорослей (мг С л/сутки)

Номер станции	23 IV	6 V	29 V	12 VI	26 VI	16 VII	1 VIII	19 VIII	4 IX	23 IX	8 X	1 XI	Сред- няя
1	0.009	0.050	0.340	0.180	0.062	0.047	0.055	0.205	0.220	0.020	0.029	0.011	0.102
2	0.024	0.095	0.300	0.153	0.172	0.053	0.270	0.293	0.330	0.040	0.063	0.008	0.150
5	—	0.036	0.099	0.113	0.035	0.045	0.170	0.104	0.110	—	0.118	—	0.092
6	—	0.140	0.105	0.063	0.061	0.026	0.166	0.147	0.125	0.019	0.155	0.004	0.092
7	—	0.048	0.080	0.117	0.037	0.069	0.188	0.127	0.106	0.045	0.084	0.006	0.083
9	—	0.056	0.158	0.069	—	0.039	0.300	0.204	0.150	0.022	0.075	0.013	0.109
Средняя, мг С л/сутки	0.017	0.071	0.180	0.118	0.073	0.046	0.190	0.180	0.180	0.029	0.042	0.008	—
Средняя, г С 1 м ² /сутки . . .	0.021	0.089	0.225	0.178	0.110	0.092	0.418	0.396	0.396	0.044	0.063	0.012	—

Деструкция органического вещества в воде (мг О₂ л/сутки)

Номер станции	6 V	28 V	12 VI	27 VI	16 VII	1 VIII	19 VIII	4 IX	23 IX	8 X	1 XI	Средняя
1	0.076	0.120	0.000	0.310	0.070	0.250	0.500	0.470	0.310	0.150	0.080	0.212
2	0.110	0.170	0.000	0.820	0.150	0.120	0.590	0.630	0.490	0.170	0.000	0.268
5	0.076	0.160	0.220	0.040	0.270 *	0.110 *	0.150	0.470	0.200	0.030	—	0.173
6	0.068	0.180	0.000	0.100	0.210 *	0.110 *	0.560	0.340	0.310	0.010	0.070	0.178
7	0.040	0.110	0.180	0.140	0.230 *	0.030	0.120	1.280	0.460	0.020	0.020	0.239
9	0.036	0.140	0.250	0.090	0.030	0.060	0.250	0.250	0.430	0.030	0.030	0.145
Средняя, мг О ₂ л/сутки	0.068	0.146	0.110	0.025	0.160	0.110	0.360	0.570	0.320	0.070	0.040	—
Средняя, мг С л/сутки	0.0255	0.0548	0.0413	0.094	0.060	0.040	0.1350	0.2138	0.1200	0.0263	0.0150	—
Средняя по станциям под 1 м ² , г С/сутки . . .	0.280	0.603	0.454	1.030	0.660	0.440	1.485	2.345	1.302	0.289	0.165	—
Средняя для всего водо- ема, г С 1 м ² /сутки	0.143	0.355	0.231	0.515	0.326	0.214	0.720	1.110	0.610	0.132	0.073	—

* Данные получены по гетеротрофной ассимиляции СО₂ (Романенко, 1965).

Таблица 5

Потребление кислорода иловыми отложениями (мг O_2 1 м²/сутки)

Номер станции	6 V	29 V	12 VII	26 VII	16 VII	1 VIII	19 VIII	4 IX	8 X	1 XI
2	51	192	210	296	186	358	480	610	68	7.6
5	65	—	—	202	—	257	416	355	—	—
6	—	191	—	—	326	306	—	—	88	18
7	59	200	322	260	522	—	493	410	31	21
9	120	182	—	507	484	—	283	590	77	27
Среднее . .	74	191	266	316	364	307	418	491	66	18
Деструкция органического вещества по средним данным, мг С под 1 м ² /сутки	27.8	71.6	99.8	119	137	115	157	184	24.8	6.8

Таблица 6

Сравнение средних величин деструкции в столбе воды и в поверхностном слое ила (мг С 1 м²/сутки)

Дата анализа	Водная масса (В)	Поверхностный слой ила (И)	В/И	Дата анализа	Водная масса (В)	Поверхностный слой ила (И)	В/И
6 V	280	27.8	10.1	1 VIII	440	115	3.82
29 V	603	71.6	8.8	19 VIII	1485	157	9.45
12 VI	454	99.8	4.55	4 IX	2345	184	12.7
26 VI	1030	119	8.65	8 X	289	24.8	11.7
16 VII	660	137	4.8	1 XI	165	6.8	24.3

дался максимальный фотосинтез. Весной и глубокой осенью при температуре воды около 0.3° деструкция органического вещества выражалась сотыми долями мг С/л в сутки.

Деструкция органического вещества в иловых отложениях определялась кислородным методом, что позволяет получить представление лишь об аэробном распаде органического вещества в самом поверхностном слое ила. Данные выполненных анализов представлены в табл. 5. В ней приведен пересчет деструкции на углерод, что дает возможность сравнить величины деструкции органического вещества в столбе воды и в поверхностном слое ила под одинаковой площадью в 1 м². Из этой таблицы видно, что максимальные величины аэробного распада органического вещества наблюдались также в периоды максимальной его продукции и были сосредоточены в тех же районах водохранилища.

Сравнение величин деструкции в водной массе и в поверхностном слое ила приведено в табл. 6. Из этой таблицы видно, что в водной массе разрушается примерно в 10 раз больше органического вещества, чем в поверхностном слое ила. Наименьшее отношение указанных величин, соответствующее значительному распаду веществ в донных отложениях, наблюдалось в летние месяцы при сравнительно тихой погоде. Осенью же это отношение возрастало с 4.8 до 24.3.

Общая численность бактерий в Рыбинском водохранилище в летний период представлена в табл. 7, а в зимний — в табл. 8. Как следует из этих таблиц, в летний период средняя численность бактерий достигала

Таблица 7

Количество бактерий в воде (млн в 1 мл)

Номер станции	23 IV	6 V	28 V	12 VI	27 VI	16 VII	1 VIII	19 VIII	4 IX	23 IX	8 X	1 XI	Среднее
1	1.15	1.15	1.06	1.69	1.26	1.45	1.95	1.78	2.27	1.47	1.36	1.05	1.47
2	1.35	1.38	1.42	1.86	1.65	1.47	1.76	1.40	1.38	1.91	1.87	0.79	1.52
5	—	0.86	1.01	2.03	1.00	1.89	1.53	1.47	1.42	—	—	1.85	1.45
6	—	1.05	1.25	1.00	0.82	1.07	1.35	1.31	1.19	—	1.70	1.12	1.19
7	—	1.08	1.22	1.22	1.18	1.30	1.44	1.26	1.51	1.35	1.95	—	1.35
9	—	1.03	1.12	1.37	1.25	1.12	1.29	1.36	0.85	1.25	1.54	1.06	1.20
Среднее	1.25	1.09	1.18	1.53	1.19	1.38	1.55	1.43	1.44	1.49	1.68	1.16	—

Таблица 8

Количество бактерий в воде в январе 1969 г. (млн в 1 мл)

Станция	Поверхность	Дно	Среднее
Первомайские острова	0.66	0.58	0.62
Русло Шексны у сел. Брейтова	0.30	0.44	0.37
Средний Двор	0.48	0.73	0.60
Измайлово	0.90	0.72	0.81
Центр водохранилища у дер. Наволок	0.51	0.52	0.51
Бывш. г. Молога	0.95	0.66	0.80
Сел. Коприно	0.73	1.31	1.02
Среднее	0.65	0.71	0.67

Таблица 9

Бактериальная ассимиляция CO₂ (мкг С л/сутки)

Номер станции	6 V	29 V	12 VI	26 VI	16 VII	1 VIII	19 VIII	4 IX	8 X	1 XI	Средняя
1	0.34	1.23	2.40	4.82	2.15	2.51	2.73	3.56	0.46	0.08	2.03
2	0.31	1.13	2.20	2.43	1.80	1.32	3.30	3.37	0.48	0.064	1.64
5	0.13	0.63	1.52	2.28	1.88	0.77	1.19	2.31	0.75	—	1.27
6	0.22	0.72	0.74	4.25	1.51	0.81	1.76	1.46	0.48	0.048	1.20
7	0.30	0.56	1.99	3.22	1.65	1.19	1.90	1.54	0.41	0.036	1.28
9	0.43	1.08	0.35	3.24	1.02	1.43	1.05	1.81	0.33	0.028	1.08
Средняя	0.29	0.89	1.53	3.38	1.67	1.34	1.99	2.41	0.48	0.051	—

1.7 млн в 1 мл при максимальной величине 2.27 млн в начале сентября в районе сел. Коприно. Минимальная численность бактерий (0.79—0.85 млн) наблюдалась в районе дер. Средний Двор и сел. Брейтова.

Средняя величина численности бактерий летом 1968 г. (1.36 млн) была несколько ниже, чем в 1967 г., что связано, очевидно, с тем, что в течение последних трех лет в водохранилище держался высокий уровень воды, что ограничивало поступление растительных остатков из зоны временного затопления. Зимой (в январе) средняя численность бактерий была значительно ниже и равнялась 0.68 млн в 1 мл.

Продукция бактериальной биомассы в воде (мкг С л/сутки)

Номер станции	6 V	29 V	12 VI	26 VI	16 VII	1 VIII	19 VIII	4 IX	8 X	1 XI	Средняя
1	5.6	20.4	39.8	80.0	35.7	41.7	45.3	59.1	7.6	1.3	33.7
2	5.1	18.8	36.5	40.3	29.9	21.9	54.8	55.9	8.0	1.1	27.2
5	2.2	10.5	25.2	37.8	31.2	12.8	19.8	38.3	12.5	—	21.1
6	3.7	12.0	12.3	70.5	25.0	13.4	29.2	24.2	8.0	0.8	19.9
7	5.0	9.3	33.0	53.5	27.4	19.8	31.5	25.6	6.8	0.6	21.3
9	7.1	17.9	5.8	53.8	16.9	23.7	17.4	30.0	5.5	0.5	17.9
Средняя ...	4.8	14.8	25.4	55.9	29.2	22.2	33.0	38.8	8.1	0.9	—

Гетеротрофная ассимиляция углекислоты дает возможность определить целый ряд микробиологических показателей, весьма важных для характеристики водной микрофлоры. Первичные данные о величине гетеротрофной ассимиляции микрофлорой Рыбинского водохранилища приведены в табл. 9.

Как видно из этой таблицы, ее максимальные значения наблюдались в конце июня в районе дер. Средний Двор (до 4.25 мкг С л/сутки) и в районе сел. Коприна (4.82 мкг С л/сутки). В на-

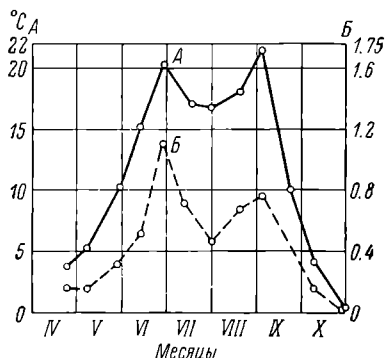


Рис. 2. Температура (А) и число поколений бактерий за сутки (Б).

чале мая и в начале ноября гетеротрофная ассимиляция выражалась сотыми долями мкг С л/сутки, что, очевидно, связано с пониженной активностью микрофлоры при низких температурах воды в водохранилище.

В. И. Романенко (1964), исследуя гетеротрофную ассимиляцию углекислоты чистыми культурами бактерий и суммарной микрофлорой воды в ее естественных условиях, нашел, что в конструктивном обмене свободная углекислота усваивается и составляет около 5—6% от приростной биомассы бактерий. Это дает возможность рассчитать прирост бактериальной биомассы по величине гетеротрофной ассимиляции углекислоты, а также время генерации бактерий и дыхание. Продукция биомассы бак-

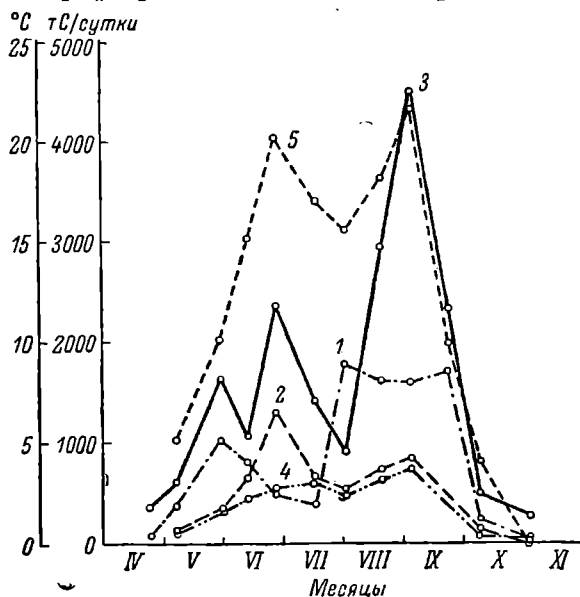


Рис. 3. Динамика продукции органического вещества за счет фотосинтеза фитопланктона (1), продукции бактериальной биомассы (2), деструкции органического вещества в воде (3), деструкции органического вещества в иловых отложениях (4) (т С в расчете на весь водоем) и температура воды (5).

терий довольно сильно колеблется в разных пунктах водохранилища (табл. 10). Очевидно, она зависит от наличия растворенных органических веществ и от температуры воды. Последний фактор, как видно из рис. 2, по-видимому, имеет для Рыбинского водохранилища основное значение. Два максимума прогрева воды (в июне и августе—сентябре) сопровождались повышенной продукцией биомассы бактерий.

Время генерации бактерий (g) в Рыбинском водохранилище было подсчитано по обычной формуле:

$$g = \frac{t \lg 2}{\lg B - \lg b},$$

где t — время опыта. Исходная биомасса бактерий (b) определялась на основании прямого счета бактерий, причем объем 1 бактериальной клетки принимался равным 0.5 мк^3 . Прирост бактерий рассчитывался изотопным методом по гетеротрофной ассимиляции углекислоты, откуда находилась конечная биомасса (B).

Т а б л и ц а 11

Время генерации бактерий в воде (g) (часы) и число генераций (n) в сутки

Номер станции	23 IV	6 V	29 V	12 VI	27 VI	16 VII	1 VIII	19 VIII	4 IX	8 X	1 XI
1g	136	136	41	34	17	18	36	32	31	118	410
n	0.17	0.17	0.58	0.70	1.41	1.33	0.67	0.75	0.77	0.20	0.06
2g	171	172	54	38	33	38	58	23	28	153	480
n	0.14	0.14	0.44	0.62	0.73	0.63	0.41	1.04	0.85	0.16	0.05
5g	—	260	67	58	23	50	80	54	30	—	—
n	—	0.09	0.36	0.41	1.04	0.48	0.30	0.44	0.80	—	—
6g	—	180	360	57	14	34	69	36	44	141	720
n	—	0.13	0.07	0.42	1.70	0.70	0.35	0.66	0.55	0.17	0.03
7g	—	144	90	30	21	37	53	32	37	194	—
n	—	0.17	0.27	0.80	1.14	0.65	0.45	0.75	0.65	0.12	—
9g	—	100	83	163	22	49	42	56	25	180	1200
n	—	0.24	0.29	0.15	1.09	0.49	0.54	0.43	0.96	0.13	0.02
Среднее время генераций (часы)	153	165	116	63	21	38	56	38	32	156	702
Среднее число генераций в сутки	0.16	0.12	0.33	0.51	1.18	0.71	0.46	0.68	0.76	0.15	0.04

Результаты анализов показали (табл. 11), что минимальное время генерации, или наибольшее число генераций бактерий за сутки (рис. 2) наблюдается в периоды наибольшего прогрева воды.

Понятно, что использованный метод имеет еще много погрешностей. Основной из них, пожалуй, является та, что он нивелирует различия в скорости размножения разных видов бактерий. Однако достоверность порядка приведенных нами величин времени генерации бактерий не вызывает сомнения.

В летний период 1968 г. чистая продукция органического вещества в пересчете на все водохранилище была больше продукции биомассы бактерий, за исключением конца июня и июля. Очевидно, бактерии для своего развития в большей мере используют органические вещества аллохтонного происхождения.

Деструкция органического вещества в водной массе была максимальной в начале сентября при наибольшей температуре воды и достигала 4.5 тыс. т в сутки в пересчете на углерод и на все водохранилище. Аэробный распад органического вещества в поверхностном слое ила также был

невелик и достигал максимальной величины в периоды отмирания планктона — 843 т С в сутки.

Результаты процессов продукции и деструкции органического вещества в Рыбинском водохранилище за вегетационный период 1968 г. (194 дня) были рассчитаны нами графически (рис. 3). Они могут быть представлены в следующем виде: 1) продукция фитопланктона — 167 000 т С на все водохранилище, или 41 г С/м²; 2) продукция бактериальной биомассы — 86 000 т С на все водохранилище, или 21 г С/м²; 3) деструкция в воде — 270 000 т С на все водохранилище, или 67 г С/м²; 4) деструкция в иловых отложениях — 74 000 т С на все водохранилище, или 18 г С/м².

ЛИТЕРАТУРА

- В и н б е р г Г. Г. 1934. Опыт изучения фотосинтеза и дыхания в водной массе озера. Тр. Лимнол. ст. в Косине, вып. 18.
- Г а м б а р я н М. Е. 1962. К методике определения интенсивности деструкции органических веществ в донных отложениях глубоководных водоемов. Микробиол., т. 31, вып. 5.
- К у з н е ц о в С. И. и В. И. Р о м а н е н к о. 1963. Микробиологическое изучение внутренних водоемов. Лабораторное руководство. М.—Л.
- К у з н е ц о в С. И., В. И. Р о м а н е н к о и Н. С. К а р п о в а. 1967. Численность бактерий и продукция органического вещества в Рыбинском водохранилище в 1965 г. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 15 (17).
- Р а з у м о в А. С. 1947. Методы микробиологических исследований воды. М.
- Р о м а н е н к о В. И. 1964. Гетеротрофная ассимиляция CO₂ бактериальной флорой воды. Микробиол., т. 33, вып. 4.
- Р о м а н е н к о В. И. 1965. Соотношение между потреблением кислорода и углекислоты у гетеротрофных бактерий при росте на пептоне. Микробиол., т. 34, вып. 3.
- Р о м а н е н к о В. И. и В. А. Р о м а н е н к о. 1969. Деструкция органического вещества в иловых отложениях Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 19 (22).
-

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В 1969 г.

Все биологические процессы в водохранилище тесно связаны с круговоротом органического вещества. Наблюдения, повторяемые из года в год, дают возможность с большой долей вероятности познать отдельные закономерности и взаимосвязь между биологическими процессами и характером окружающей среды.

Микробиологические наблюдения были начаты в 1954 г. и продолжают до настоящего времени на шести станциях, достаточно полно характеризующих открытую часть водохранилища (рис. 1). В 1969 г. они проводились, как и в предыдущие годы, один раз каждые две недели в течение всего вегетационного периода. Ст. 1 находится у сел. Коприна, ст. 2 — у затопленного г. Мологи, ст. 5 — к юго-западу от дер. Измайлово, ст. 6 — у дер. Средний Двор, ст. 7 — в центре водохранилища у затопленной дер. Наволок и ст. 9 — к северо-востоку от сел. Брейтова (указанная нумерация станций приведена в таблицах).

Уровень воды¹ в водохранилище в 1969 г. был очень близким к уровню воды 1968 г. с той разницей, что максимальный паводок наблюдался на две недели позднее — в третьей декаде июня — и на 0.4 м не достигал нормального подпорного уровня (рис. 2.)

По данным Рыбинской гидрометеорологической обсерватории, поступление воды в водохранилище достигало максимальной величины в апреле и мае — 5.8 и 7.1 км³ (табл. 1; рис. 3) и резко падало с июля по октябрь, причем максимальное количество поступало с водосборной площади по малым рекам. Сброс воды через плотину был наименьшим в апреле, мае и июне.



Рис. 1. Местоположение и номера стандартных станций на Рыбинском водохранилище.

¹ Материалы по годовому изменению уровня воды в водохранилище и водному балансу были предоставлены нам сотрудниками Рыбинской гидрометеообсерватории, за что приносим им большую благодарность.

Таблица 1

Водообмен в Рыбинском водохранилище в 1969 г. (млн м³)

Источники поступления	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
Молога у сел. Лентьева	178	117	112	140	1977	751	305	198	165	309	556	712	5520
Болга у г. Углича	348	336	579	1340	654	814	254	137	135	171	757	1087	6612
Шексна	303	358	364	166	1181	588	129	91	197	233	534	675	4819
Боковой приток (малые реки)	151	121	115	4248	2291	615	303	214	224	537	1567	836	11222
Суммарный приток	980	932	1180	5894	6097	2768	991	640	721	1250	3414	3310	28177
Сброс через Рыбинский гидро-узел	3511	1372	2041	736	520	1109	2622	2397	2748	1567	1115	2756	22495

Таблица 2

Температура (°С) и прозрачность воды по диску Секки (см)

Номер стан-ции	Показатель	13 V	4 VI	18 VI	1 VII	14 VII	1 VIII	18 VIII	3 IX	23 IX	8 X	22 X	Средняя
1	Температура	8.8	11.7	15.5	16.2	23.4	19.3	17.2	17.2	10.0	7.0	6.5	13.8
	Прозрачность	95	95	100	100	150	130	100	150	150	130	190	126
2	Температура	9.5	9.8	14.6	16.0	19.7	20.2	17.5	17.1	11.0	7.0	5.8	13.4
	Прозрачность	105	120	90	90	155	100	110	100	100	110	120	110
5	Температура	7.4	10.8	15.7	15.2	22.3	20.2	17.0	17.0	9.8	7.2	5.9	13.5
	Прозрачность	95	100	190	95	250	170	250	100	100	100	95	140
6	Температура	4.9	11.2	14.8	15.1	21.0	19.7	16.8	17.0	11.0	7.0	6.3	13.1
	Прозрачность	290	200	210	110	250	170	240	200	—	170	130	197
7	Температура	5.5	9.8	15.0	15.2	22.2	20.6	17.0	17.0	9.0	6.8	5.9	13.1
	Прозрачность	290	150	200	70	260	150	140	150	140	110	160	165
9	Температура	5.3	11.1	14.5	15.2	21.0	20.0	16.8	17.2	11.0	7.1	6.2	13.2
	Прозрачность	140	195	145	140	230	200	120	150	—	90	130	154
	Средняя температура	6.9	10.7	15.0	15.5	21.6	20.2	17.0	17.0	10.0	10.1	6.1	—
	Средняя прозрачность	170	160	159	101	217	158	160	141	122	118	138	—

Электропроводность воды (мксим)

Номер станции	13 V	4 VI	18 VI	1 VII	14 VII	1 VIII	18 VIII	3 IX	23 IX	8 X	22 X	Средняя
1	165	141	147	161	188	198	178	190	195	211	227	182
2	211	169	154	159	188	171	176	173	169	174	177	175
5	121	165	155	164	197	179	174	175	172	171	176	168
6	199	180	169	157	178	184	164	173	166	169	174	174
7	247	175	167	151	175	163	161	165	—	166	170	174
9	204	116	127	159	161	127	157	163	162	162	169	155
Средняя . . .	191	158	153	158	181	170	168	173	173	176	182	—

Поскольку вода, поступающая в водохранилище, несет готовое органическое вещество и биогенные элементы, то она может оказывать заметное влияние на развитие фитопланктона и бактерий. Действительно, в июне после поступления основной массы воды фотосинтез был максимальным.

Всего в 1969 г. в Рыбинское водохранилище поступило 28.177 км³ воды и было сброшено 22.495 км³ (табл. 1). Иными словами, водный баланс был положительным и равнялся 5.682 км³.

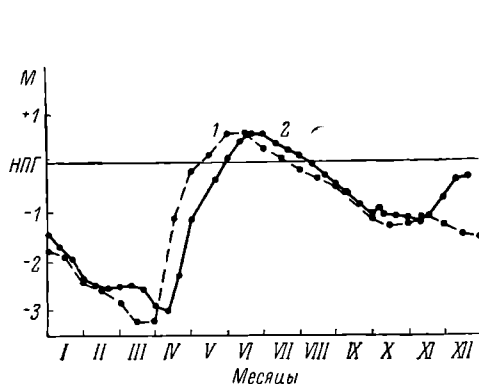


Рис. 2. Изменение уровня воды в водохранилище в 1968 (1) и в 1969 гг. (2).

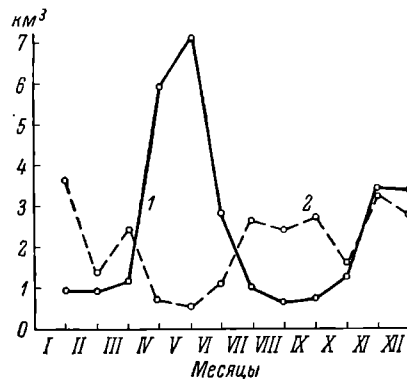


Рис. 3. Приток воды в водохранилище (1) и сброс ее через плотину (2) в 1969 г.

Весенний прогрев начался на речных участках (табл. 2), где температура воды была на 2–4° выше, чем в центральной части водохранилища. В остальное время вегетационного периода температура воды в водохранилище в отдельные сроки на разных станциях колебалась в пределах 1°.

Максимальная прозрачность воды наблюдалась в середине мая и в середине июля в центральной части водохранилища на ст. 6 и 7.

Электропроводность воды в Рыбинском водохранилище в 1969 г. имела два минимума (табл. 3). Первый наблюдался во второй половине июня и совпадал с периодом паводка, второй, менее выраженный, — во второй половине лета. Таким образом, наибольшее содержание солей было в мае, когда уровень воды в водохранилище начал подыматься за счет притока волжских и шекснинских вод, а зимние, наиболее концентрированные воды были отнесены в середину водохранилища.

Фотосинтез фитопланктона определялся изотопным методом в модификации Ю. И. Сорокина (Кузнецов и Романенко, 1963).

Интенсивность фотосинтеза фитопланктона (мг С л/сутки)

Номер стан-ции	13 V	4 VI	18 VI	1 VII	14 VII	1 VIII	18 VIII	3 IX	23 IX	8 X	22 X	Сред-няя
1	0.032	0.488	0.352	0.152	0.188	0.360	0.232	0.064	0.124	0.040	0.068	0.191
2	0.264	0.380	0.440	0.184	0.052	0.660	0.256	0.088	0.224	0.116	0.056	0.247
5	0.044	0.328	0.068	0.104	0.020	0.176	0.080	0.120	0.076	0.048	0.016	0.098
6	0.028	0.232	0.080	0.124	0.044	0.156	0.220	0.056	0.176	0.048	0.020	0.108
7	0.060	0.148	0.108	0.108	—	0.156	0.256	0.056	0.052	0.036	0.020	0.100
9	0.048	0.268	0.184	0.116	0.080	0.340	0.440	0.080	0.092	0.052	0.024	0.157
Сред-няя	0.079	0.307	0.205	0.131	0.077	0.308	0.247	0.077	0.124	0.057	0.034	—

Первым очагом фотосинтеза (табл. 4) в мае 1969 г. был район затопленного г. Мологи, где 13 мая синтезировалось 0.264 мг С л/сутки. Максимальная интенсивность фотосинтеза в этот период совпала с наибольшим прогревом воды в данном районе при прозрачности воды около 1 м. В связи с дальнейшим прогревом воды интенсивность фотосинтеза в июне достигла наибольшей величины по всей акватории водохранилища, а второй максимум, связанный с развитием синезеленых водорослей, пришелся на август (табл. 4). Максимальная величина фотосинтеза по средним данным за весь вегетационный период (0.247 мг С л/сутки) была в районе г. Мологи, а минимальная (0.098 мг С л/сутки) — в открытой части водохранилища.

Деструкция органического вещества в водохранилище в летний период определялась по снижению содержания кислорода в изолированном объеме воды в условиях инкубации в темных склянках при температуре воды водоема. Весной и осенью, когда деструкция органического вещества кислородным методом не учитывается ввиду его низкой чувствительности, анализы проводились изотопным методом (Романенко, 1964а) по величине гетеротрофной ассимиляции углекислоты.

Величины деструкции определялись в поверхностном слое воды и пересчитывались на весь столб от поверхности до дна водохранилища. Такой пересчет мы считали возможным, так как на близкие значения деструкции во всем столбе воды Рыбинского водохранилища, где постоянно идет полное перемешивание воды, указывали наши прежние наблюдения (Романенко, 1967а).

Наибольшая деструкция органического вещества (0.88 мг С л/сутки), особенно в конце июля и в августе, наблюдалась в районе распростране-

Таблица 5

Деструкция органического вещества в воде (мг С л/сутки)

Номер стан-ции	13 V	4 VI	18 VI	1 VII	14 VII	1 VIII	18 VIII	3 IX	23 IX	8 X	22 X	Сред-няя
1	0.078	0.101	0.064	0.038	0.881	0.416	0.180	0.079	0.148	0.086	0.020	0.191
2	0.118	0.069	0.098	0.011	0.435	0.491	0.191	0.026	0.109	0.072	0.020	0.149
5	0.087	0.105	0.008	0.049	0.150	0.075	0.083	0.083	0.108	0.075	0.019	0.076
6	0.058	0.080	0.011	0.000	0.098	0.124	0.142	0.083	0.176	0.062	0.014	0.077
7	0.022	0.062	0.079	0.000	0.154	0.236	0.120	0.083	0.068	0.073	0.022	0.084
9	0.061	0.086	0.000	0.068	0.188	0.229	0.225	0.071	0.085	0.042	0.016	0.097
Сред-няя	0.071	0.084	0.043	0.028	0.318	0.261	0.157	0.071	0.117	0.068	0.018	—

ния волжской воды на станциях у сел. Коприна и затопленного г. Мологи (табл. 5). Второй период увеличения деструкции отмечался в конце сентября и совпадал с понижением температуры и отмиранием фитопланктона. Наименьшие значения деструкции были в конце октября, когда температура воды упала до 5°.

Деструкция органического вещества в поверхностном слое иловых отложений определялась по поглощению кислорода из воды, находящейся над илом, заключенным в стратометрическую трубку (Романенко и Романенко, 1969). Соответствующие пересчеты были сделаны на 1 м² и выражены в углероде.

В среднем потребление кислорода придонными слоями ила в летний период было около 440 мг О₂ на 1 м² в сутки. Максимальные значения (до 900 мг О₂ на 1 м² в сутки) наблюдались в конце июля в районе сел. Брейтова. Для определения величины деструкции органического вещества полученные данные были пересчитаны на углерод. Деструкция в поверхностном слое ила за счет аэробных процессов преобладала в первую половину вегетационного периода, в ноябре она стала сильно падать. Ее максимальные величины наблюдались в конце июля и конце августа в сроки, следующие за периодами максимального фотосинтеза фитопланктона. В середине июля максимальная деструкция органического вещества ила соответствовала 360 мг С на 1 м² в сутки (табл. 6). Эти данные были использованы нами для определения деструкции органического вещества во всем водохранилище.

Т а б л и ц а 6

Потребление кислорода иловыми отложениями (мг О₂ 1 м²/сутки)

Номер станции	13 V	4 VI	18 VI	1 VII	14 VII	1 VIII	18 VIII	3 IX	23 IX	22 X	Среднее
2	294	205	450	192	829	353	640	480	—	180	403
6	290	520	330	534	829	312	670	341	—	473	478
7	340	567	470	262	719	605	600	350	258	150	424
9	465	520	514	500	900	27	720	319	—	215	465
Среднее	347	454	441	371	819	324	657	371	256	253	—
Среднее за рейс, мг С 1 м ² /сутки	153	199	194	163	360	143	289	163	113	111	—

Чем больше изучается численность бактерий в водоеме, тем отчетливее выступает условность этого понятия. В самом деле, работы по применению методов электронной микроскопии показывают (Никитин и Кузнецов, 1967; Беляев, 1967), что в водоеме имеется целый ряд форм, не видимых под микроскопом. Далее, было показано (Романенко, 1971), что применение более совершенной оптики позволяет учитывать в 1¹/₂ раза больше бактерий, чем при учете с апохроматом ×90 и окуляром ×10. Необходимо, кроме того, подчеркнуть, что само понятие общей численности бактерий представляет результирующую их размножения, отмирания и выедания.

Несмотря на все оговорки, общее число бактерий, как показал А. С. Даукшта (1969), тесно связано с трофией водоема. В эвтрофных водоемах эта величина колеблется от 2 до 4 млн в 1 мл воды, а в олиготрофных лишь в поверхностных горизонтах достигает 400 000 в 1 мл, в гипolimнионе же не превышает 100 000 в 1 мл.

Наблюдения за общей численностью бактерий в Рыбинском водохранилище ведутся методом прямого счета по А. С. Разумову (1947) регулярно с 1954 г. Анализы показали, что количество бактерий зависит от температуры воды и содержания легкоусвояемого органического вещества,

а также связано в какой-то мере с многоводностью года, следующего за маловодным. В течение летнего периода обычно отмечается два максимума — в конце весеннего паводка и осенью в октябре. Аналогичная картина наблюдалась и в 1969 г. — третий год подряд с высоким уровнем воды. Данные по общей численности бактерий (табл. 7) в дальнейшем были использованы нами для определения времени генерации и продукции биомассы бактерий.

Т а б л и ц а 7

Количество бактерий в воде (млн в 1 мл)

Номер станции	13 V	4 VI	18 VI	1 VII	14 VII	1 VIII	18 VIII	3 IX	23 IX	8 X	22 X	Среднее
1	1.45	2.47	1.94	1.52	1.47	1.46	1.27	1.27	1.37	1.42	3.30	1.72
2	2.13	2.43	1.77	1.60	1.00	1.42	1.50	1.20	1.28	1.91	1.52	1.61
5	1.79	2.05	1.86	1.13	0.99	0.98	1.04	1.76	1.51	2.11	1.49	1.52
6	1.84	2.16	1.21	1.24	1.04	1.14	1.40	1.25	1.27	2.26	1.46	1.48
7	1.46	2.50	1.44	1.37	1.40	0.90	1.23	1.02	—	1.74	4.97	1.90
9	1.19	1.72	1.25	1.37	—	0.99	1.23	1.17	1.07	1.90	1.39	1.33
Среднее	1.64	2.22	1.58	1.37	1.18	1.15	1.28	1.28	1.30	2.06	2.36	—

Развитие гетеротрофных бактерий в водоеме происходит за счет использования растворенных органических веществ, при этом ассимилируется, по реакции Вуда и Беркмана, свободная углекислота. Биомасса их (в количестве 6%) строится за счет фиксации углекислоты (Романенко, 1964а, 1964б). Автотрофные бактерии (нитрификаторы, тионовые и некоторые другие) строят свое тело целиком за счет углекислоты. Как показали наши исследования, развитие автотрофных бактерий в Рыбинском водохранилище наблюдается лишь в поверхностном слое ила в бывших руслах рек Мологи, Шексны и Волги, а основная фиксация углекислоты происходит в процессе усвоения органического вещества гетеротрофными бактериями.

В 1969 г. гетеротрофная ассимиляция углекислоты определялась с помощью C^{14} . Испытуемая вода разливалась в склянки, в них вносилась сода, меченная по углероду. Инкубация склянок проводилась в течение суток в темноте при температуре воды водоема. После этого вода фильтровалась через мембранный фильтр № 2 и радиоактивность фильтра определялась под торцовым счетчиком после соответствующей обработки фильтра соляной кислотой для удаления карбонатов.

Наибольшая гетеротрофная ассимиляция отмечалась в речных плесах водохранилища у сел. Брейтова, Коприна и затопленного г. Мологи. Особенно высокие значения фиксации углекислоты (до 15 мкг С на 1 л в сутки) наблюдались в августе (табл. 8). Средние значения (по данным отдельных рейсов) находились в пределах 1.5—2.5 мкг С на 1 л в сутки. Лишь в конце октября, когда происходило общее затухание биологических процессов в водохранилище, гетеротрофная фиксация углекислоты снизилась до 0.39 мкг С на 1 л в сутки.

На основе величин гетеротрофной ассимиляции углекислоты (табл. 8) была рассчитана продукция биомассы бактерий за 24 часа, причем было принято, что 6% биомассы бактерий образуется за счет гетеротрофной ассимиляции. Наибольшая продукция бактериальной массы (132 мкг С л/сутки) была в начале августа (табл. 9), когда наблюдалось летнее снижение численности бактерий. В среднем в большинстве рейсов она колебалась от 25 до 47 мкг С на 1 л в сутки. Резкое снижение ее (до 6.6 мкг С л/сутки) произошло лишь в конце октября.

Сумма гетеротрофной ассимиляции CO₂ и хемосинтеза в воде (мкг С л/сутки)

Номер станции	13 V	4 VI	18 VI	1 VII	14 VII	1 VIII	18 VIII	3 IX	23 IX	8 X	22 X	Среднее
1	1.66	2.15	2.93	1.81	4.90	15	2.40	1.82	3.14	1.84	0.44	3.45
2	2.53	1.46	2.78	2.46	3.20	9.4	2.10	2.03	2.32	1.54	0.44	2.75
5	1.86	2.25	1.91	1.55	1.28	5.9	2.06	1.99	2.31	1.59	0.41	2.10
6	1.23	1.70	1.38	1.05	2.52	4.2	2.83	1.44	3.75	1.31	0.30	1.97
7	0.47	1.33	0.99	1.87	1.42	3.5	2.22	1.39	1.46	1.55	0.47	1.51
9	1.29	1.83	2.25	1.32	2.48	9.5	3.36	1.28	1.82	0.9	0.33	2.58
Средняя	1.51	1.78	2.04	1.68	2.63	7.9	2.83	1.66	2.47	1.45	0.39	—

На основе общей численности бактерий (табл. 7) была рассчитана их биомасса. Условно было принято, что 1 бактерия имеет объем 0.5 мк³, влажность — 85% и содержание углерода в сухой биомассе — 50%.

Таблица 9

Продукция бактериальной биомассы в воде (мкг С л/сутки)

Номер станции	13 V	4 VI	18 VI	1 VII	14 VII	1 VIII	18 VIII	3 IX	23 IX	8 X	22 X	Средняя
1	28	36	49	30	82	250	40	30	52	31	7.3	58
2	42	24	46	41	53	157	35	34	39	26	7.3	46
5	31	38	32	26	21	99	34	33	39	27	6.8	35
6	21	28	23	18	42	69	47	24	63	22	5.0	33
7	7.8	22	17	31	24	59	37	23	24	26	7.8	25
9	22	31	3.8	22	41	159	90	21	30	15	5.5	43
Средняя	25	30	34	28	44	132	47	27	41	24	6.6	—

Зная биомассу, выраженную в углероде, и ее прирост за сутки (табл. 9), можно определить время генерации бактерий (g) по формуле:

$$g = \frac{t \lg 2}{\lg B - \lg b},$$

где t — длительность опыта, часы; b — начальная биомасса; B — конечная биомасса, равная $b + P$, где P — продукция бактерий за время опыта.

Таблица 10

Время генерации бактерий в воде (часы)

Номер станции	13 V	4 VI	18 VI	1 VII	14 VII	1 VIII	18 VIII	3 IX	23 IX	8 X	22 X	Среднее
1	40	51	32	44	18	10	27	33	23	36	280	54
2	39	72	31	31	19	12	44	29	28	54	138	45
5	47	42	44	35	36	13	26	41	32	58	141	47
6	64	34	39	51	23	17	26	40	41	73	190	54
7	126	36	62	34	44	17	28	35	—	71	400	85
9	42	43	28	47	—	10	13	41	18	87	164	49
Среднее	59	46	39	40	28	13	27	36	28	63	219	—

Зависимость между температурой воды и быстротой размножения бактерий

	13 V	4 VI	18 VI	1 VII	14 VII	1 VIII	18 VIII	3 IX	23 IX	8 X	22 X
Среднее число генераций в сутки	0.44	0.55	0.65	0.62	0.97	1.91	1.00	0.67	0.91	0.41	0.11
Средняя темпера- тура (°C)	6.9	10.7	15.0	15.5	21.6	20.2	17.0	17.0	10.0	10.1	6.1

Результаты соответствующих расчетов для водохранилища представлены в табл. 10.

Весной при низких температурах воды, особенно в средней части водохранилища, на ст. 7 время генерации составило около 126 час. В сред-

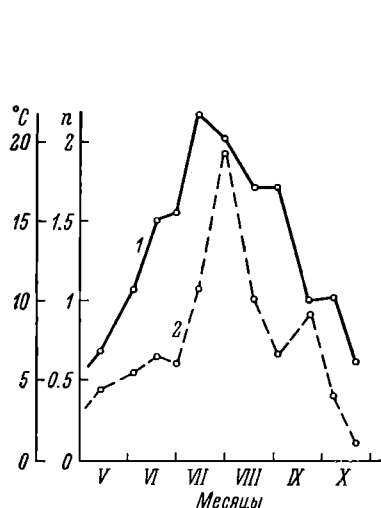


Рис. 4. Температура воды (1) и число генераций бактерий (n) за сутки (2) в водохранилище в 1969 г.

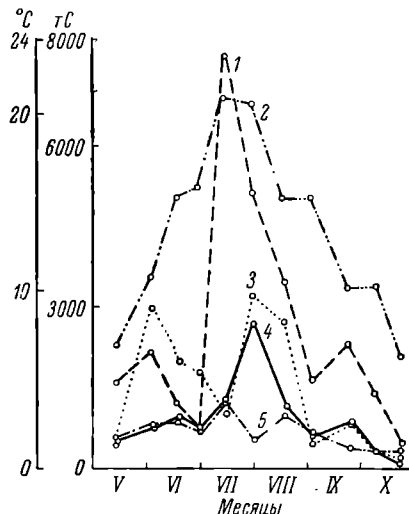


Рис. 5. Динамика продукции и деструкции органического вещества (т С на все водохранилище за сутки).

1 — деструкция органического вещества в воде; 2 — температура воды; 3 — первичная продукция органического вещества за счет фотосинтеза фитопланктона; 4 — продукция бактериальной биомассы в воде; 5 — деструкция органического вещества в иловых отложениях.

нем же по всем станциям в данном рейсе оно равнялось 59 час. По мере прогрева воды, образования автохтонного органического вещества и иных благоприятных условий время генерации бактерий сократилось в августе в среднем до 13 час., т. е. за сутки проходило две генерации бактерий (рис. 4). Этим можно объяснить и максимальную продукцию бактерий в водохранилище в рассматриваемый период, несмотря на их низкую численность. Такое соотношение большой продукции при малой численности, очевидно, можно объяснить только сильным выеданием бактерий зоопланктоном в этот срок наблюдений. С октября в связи с похолоданием воды время генерации бактерий постепенно удлиняется и в среднем приближается к 200 час. Температура является одним из основных факторов, влияющих на скорость размножения бактерий (рис. 4; табл. 11).

Фотосинтез, деструкция органического вещества и продукция биомассы бактерий

Показатель	13 V	4 VI	18 VI	1 VII	14 VII	1 VIII	3 IX	23 IX	8 X	22 X
Фотосинтез, г С 1 м ² /сутки . . .	0.104	0.699	0.467	0.358	0.210	0.841	0.101	0.163	0.075	0.045
Площадь водохранилища, км ² . .	3910	4275	4450	4450	4345	3755	3960	3766	3674	3650
Фотосинтез, т С на весь водоем в сутки	407	2988	2078	1593	912	3167	399	614	276	164
Деструкция в воде, мг С л/сутки	0.071	0.084	0.043	0.028	0.318	0.261	0.071	0.117	0.068	0.018
Объем водохранилища, км ³ . . .	19.94	23.05	24.56	24.56	23.66	18.71	20.36	17.76	17.93	17.38
Деструкция в воде, т С на весь во- доем в сутки	1415	1936	1056	688	7524	4883	1446	2077	1219	312
Деструкция в иле, т С на весь во- доем в сутки	508	726	734	618	1333	455	550	361	—	347
Продукция бактериальной био- массы в воде т С на весь водоем в сутки	499	691	835	687	1041	2469	549	728	430	115

Приведенные материалы позволили с известной степенью приближения сделать обобщения и на весь водоем. Все данные расчетов на весь водоем по фотосинтезу, деструкции органического вещества и продукции бактериальной биомассы, выраженные в тоннах углерода за одни сутки, представлены в табл. 12.

Сопоставление продукции бактериальной биомассы, органического вещества, образовавшегося в процессе фотосинтеза и его деструкции (рис. 5), показывает, что лишь в июне продукция органического вещества за счет фотосинтеза превышала деструкцию, которая особенно была велика в середине июля (до 7.5 тыс. т С в сутки). Суточная продукция бактериальной биомассы лишь в конце июля и конце октября выражалась величинами одного порядка с фотосинтезом. В общем, образование органического вещества за счет фотосинтеза в 1969 г. было вдвое больше продукции биомассы бактерий.

По площадям, ограниченным осью абсцисс и кривыми динамики продукции биомассы бактерий, фотосинтеза фитопланктона и деструкции органического вещества в воде и иловых отложений, графическим методом были определены суммарные величины продукции и деструкции органического вещества за вегетационный период 1969 г. длительностью 184 дня. Данные расчетов приведены ниже:

Показатель	На весь водоем, т С	Под 1 м ² , г С
Фотосинтез фитопланктона	261 000	65
Деструкция в воде	456 000	113
Деструкция в иле	113 000	28
Продукция бактериальной биомассы	143 000	35

По сравнению с предыдущими годами деструкция органического вещества в водной массе в 1969 г. колебалась мало — 456 000 т С на все водохранилище, или около 113 г С на 1 м², в то время как продукция фитопланктона изменялась в значительных пределах. Так, в 1964 г. она равнялась 117 000 т, в 1965 г. — 83 000 т, а в 1969 г. — 261 000 т С за вегетационный период. Продукция биомассы бактерий в 1965 г. составляла 231 000 т, в 1969 г. — всего 143 000 т С на все водохранилище.

Данные солнечной радиации в районе водохранилища за вегетационный период 1969 г., предоставленные нам Рыбинской гидрометеорологиче-

Т а б л и ц а 13

Эффективность использования солнечной энергии фитопланктоном

	V	VI	VII	VIII	IX	X	Сумма
Солнечная радиация, ккал. на 1 м ² за месяц . . .	126 000	128 000	133 000	116 000	58 000	25 000	586 000
Солнечная радиация за вычетом альбеда (10%), ккал. на 1 м ² за месяц	11 4000	115 000	120 000	104 000	52 000	22 000	527 000
Интенсивность фотосинтеза, ккал. на 1 м ² за месяц	103	210	164	220	58	22	777
% использованной солнечной радиации	0.09	0.18	0.11	0.19	0.11	0.10	0.14

ской обсерваторией, были пересчитаны в килокалории на 1 м² за месяц. Это дало возможность определить количество солнечной энергии, используемой фитопланктоном в процессе фотосинтеза. Поскольку радиоуглеродный метод в той модификации и с теми коэффициентами, которые применяются нами при работе с радиоактивным изотопом, дает величину на 25—30% меньше валовой продукции (Романенко, 1967б), при расчетах (табл. 13) в величину фотосинтеза, полученную в 1969 г. (65 г С/м²), была внесена поправка на 25%.

С мая до августа включительно солнечная радиация колебалась от 116 000 до 133 000 ккал. на 1 м² поверхности водохранилища за месяц, с наступлением осени она резко снизилась. Наиболее эффективное использование солнечной радиации фитопланктоном наблюдалось в июле и августе (0.19%), в остальные месяцы вегетационного периода использовалось лишь около 0.1% радиации.

ЛИТЕРАТУРА

- Бел я е в С. С. 1967. Распространение группы *Caulobacteriales* в водохранилищах Волго-Дона. Микробиол., т. 36, вып. 1.
- Д а у к ш т а А. С. 1969. Микробиологическая характеристика основных типов озер Латвийской ССР. Автореф. канд. дисс. Вильнюс.
- К у з н е ц о в С. И. и В. И. Р о м а н е н к о. 1963. Микробиологическое изучение внутренних водоемов. Лабораторное руководство. М.—Л.
- Н и к и т и н Д. И. и С. И. К у з н е ц о в. 1967. Применение электронной микроскопии для изучения водной микрофлоры. Микробиол., т. 36, вып. 5.
- Р а з у м о в А. С. 1947. Методы микробиологических исследований воды. М.
- Р о м а н е н к о В. И. 1964а. Зависимость между количеством потребляемых гетеротрофными бактериями О₂ и СО₂. ДАН СССР, т. 157, № 1.
- Р о м а н е н к о В. И. 1964б. Гетеротрофная ассимиляция СО₂ бактериальной флорой воды. Микробиол., т. 33, вып. 4.
- Р о м а н е н к о В. И. 1967а. Соотношение между фотосинтезом фитопланктона и разрушением органического вещества в водохранилищах. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 15 (18).
- Р о м а н е н к о В. И. 1967б. Сравнение кислородного и радиоуглеродного методов определения интенсивности фотосинтеза фитопланктона. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 15 (18).
- Р о м а н е н к о В. И. 1971. К методике определения количества бактерий на мембранных фильтрах по Разумову. Гидробиол. журн., № 1.
- Р о м а н е н к о В. И. и В. А. Р о м а н е н к о. 1969. Деструкция органического вещества в иловых отложениях Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 19 (22).
-

К КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ ЭКОСИСТЕМЫ ПЕЛАГИАЛИ ОЗЕРА ДАЛЬНОГО НА КАМЧАТКЕ

Озеро Дальнее расположено вблизи Авачинской бухты. Оно является местом воспроизводства лососевых рыб — красной и кижуча. Морфометрическая характеристика озера и основные особенности его гидрохимического и гидрологического режима приводятся в работах Е. М. Крохина (1948, 1960, 1965). Экосистема озера детально изучалась Е. М. Крохиным (1948, 1957, 1960, 1968а, 1968б, 1969), В. Ф. Крогиус и Е. М. Крохиным (1948), Б. П. Кожевниковым (1968), Ф. В. Крогиус (1969; Крогиус и др., 1969). Полученные данные использованы для кибернетического моделирования сообщества пелагических рыб (Крогиус и др., 1969) и для характеристики потоков энергии на всех трофических уровнях (Крохин, 1969). Настоящая работа выполнена по договору между Камчатским отделением ТИНРО и ИБВВ АН СССР, заключенному по предложению Е. М. Крохина и Ф. В. Крогиус. Целью ее было получение более подробной количественной характеристики биомассы продукции и метаболизма отдельных компонентов экосистемы пелагиали. Ниже приводятся результаты этих исследований.

МЕТОДИКА

Пробы для анализов отбирались с помощью пластмассового батометра Суслева емкостью 3 л. Батометр представляет собой цилиндр с полностью откидывающимися крышками. Горизонты для отбора проб выбирались с учетом стратификации водной толщи. В слое скачка пробы брались с меньшими интервалами (0.5—1 м) с тем, чтобы полнее учесть организмы и их продукцию в зоне термоклина, где обычно наблюдается их скопление в виде слоев (Сорокин, 1968). Всего по вертикали пробы отбирались с 12—15 горизонтов.

Первичная продукция органического вещества за счет фотосинтеза фитопланктона определялась с помощью радиоуглеродного метода по схеме, описанной ранее (Сорокин, 1958). Для получения световых кривых K_t пользовались смешанной пробой воды с глубины 2 и 8 м с тем, чтобы нивелировать влияние световой адаптации фитопланктона. В этих опытах склянки экспонировались в течение полного светового дня в толще воды с интервалами 1—2 м до глубины 20 м. Для измерения фотосинтеза использовались склянки емкостью 250 мл. Фильтрация проб производилась через мембранные фильтры № 5. Фактическая общая радиоактивность раствора карбоната C^{14} , добавляемого в склянки, составляла $1.5-2 \cdot 10^6$ имп./л.

Для получения кривых K_p , характеризующих вертикальное распределение активного фитопланктона, пробы воды с разных глубин экспонировались в водоеме при умеренном освещении под марлевым навесом.

Численность и биомасса фитопланктона учитывались путем подсчета клеток на мембранных фильтрах, окрашенных эритрозином. Клетки диатомовых (*Stephanodiscus*), которые преобладали в фитопланктоне, на фильтрах не деформировались. Содержание углерода в расчете на 1 клетку *Stephanodiscus* определялось путем бихроматного сжигания взвеси клеток, в которой число их просчитывалось в камере Фукс-Розенталя.

Численность и биомасса бактерий учитывались также путем прямого микроскопирования на окрашенных ультрафильтрах VUFS. Для расчета биомассы клеток бактерий исходили из их размеров на сухих мембранных фильтрах с введением поправки ($\times 2.5$) на уменьшение размеров при высыхании. Содержание углерода в сырой биомассе бактерий принималось равным 10% (Троицкий и Сорокин, 1967).

Продукция бактериопланктона (P) определялась радиоуглеродным методом (Романенко, 1964). Ее рассчитывали, исходя из величины гетеротрофной ассимиляции CO_2 (A , мг $\text{C}/\text{м}^3$ в сутки) микрофлорой, по формуле $P = A \cdot 20$ мг $\text{C}/\text{м}^3$ в сутки. Вода для определения величины A фильтровалась через 2 слоя планктонного газа № 76. Скланки экспонировались в темноте при температуре, близкой к таковой *in situ*. Фактически учитываемая радиоактивность карбоната в опытах составляла $30 \cdot 10^6$ имп./л.

Жутиковые учитывались в живом виде путем подсчета в нескольких порциях воды объемом 0.1 мл тотчас после доставки проб в лабораторию. Инфузории подсчитывались аналогичным образом в порциях воды объемом 1—2 мл в камере В. Г. Богорова. Биомасса простейших определялась на основе измерения их среднего объема. Численность зоопланктона учитывалась в пробах, отбирившихся батометром Сусляева. Батометр опускался со значительной скоростью и срабатывал в момент его остановки. Тем самым предотвращалось разбегание подвижных форм из высеченного им объема.

Для пересчета сырой биомассы простейших в мг C пользовались коэффициентом 0.075. Биомасса зоопланктона рассчитывалась сразу в единицах углерода на основании содержания его в расчете на 1 экземпляр животного. Последняя величина находилась путем бихроматного сжигания определенного числа экземпляров. Ориентировочная продукция простейших и зоопланктона рассчитывалась с учетом вероятных коэффициентов P/V (Петрович, 1968; Петрова и др., 1969) и температурных поправок по Крогу с учетом температуры воды на глубине, соответствующей максимуму их численности. Для пересчета 1 г биомассы и продукции, выраженных в единицах углерода, в килокалории пользовались коэффициентом 9.3.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подробные обследования толщи воды на оз. Дальнем были выполнены на основной станции в центре озера над глубиной 56 м трижды: 2—6 июля, 16—18 июля и 31 июля—2 августа 1969 г. Кроме того, 19—20 июля было проведено обследование толщи воды у берега над глубиной 21 м. Цикл биологических явлений на озере последовательно описан в работе Е. М. Крохина (1948). В начале июня вслед за прогревом толщи воды начинается цветение диатомовых водорослей, среди которых преобладает *Stephanodiscus*. К началу июля на глубине 7—10 м стабилизируется термоклин. Ввиду следующего за формированием скачка замедления вертикального водообмена биогены в эпилимнионе быстро потребляются фитопланктоном и последний вследствие их недостатка вскоре начинает отмирать. К началу августа концентрация фитопланктона падает до минимума. В сентябре в озере начинается развитие зеленых и синезеленых водорослей, среди которых преобладает *Gloecoccus* и *Staurastrum*. Таким образом, наши наблюдения были начаты в период развития диатомовых и закончены в конце первой фазы биологического цикла. В качестве примера, характеризующего объем материала, использованного для построения соответствующих графиков, в табл. 1 представлены первичные результаты измерений, выполненных 16—18 июля на основной станции в оз. Дальнем.

ХАРАКТЕРИСТИКА БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА ЦЕНТРАЛЬНОЙ СТАНЦИИ ОЗ. ДАЛЬНОГО

Биомасса и продукция фитопланктона

Как уже указывалось, первые наши наблюдения были выполнены 2—6 июля в период интенсивного развития диатомовой водоросли *Stephanodiscus astraea* var. *minutulus* (Kütz.) Grun. (определение Г. В. Кузьмина). Продукция фотосинтеза в этот период составляла в слоях максимумов 500—600 мг $\text{C}/\text{м}^3$ и в столбе воды — 4800 мг $\text{C}/\text{м}^2$ в сутки. Максимумы фотосинтеза были обнаружены на глубинах 4 и 10 м. Первый из

Количественная характеристика компонентов экосистемы оз. Дальнего в толще воды на станции в центре озера (глубина 56 м) 16—18 июля 1969 г.

Глубина, м	Температура	Фотосинтез			Фито-планктон		Сточная дезструкция		Бактерио-планктон		Простейшие			Наутили-усы		Асplanкна		Диатомо-мусы		Циклопы	
		К _p , ‰		К _c , ‰	К _c , ‰	Р	V	мг O ₂ /л	мг C/м ³	10 ⁶ /мл	V	10 ³ /л	V	N/л	B	N/л	B	N/л	B	N/л	B
		100	100																		
0	15.4	100	100	100	72	4.1	17.5	0.24	87	2.14	68	12.8	115	19	0	0	44	8.8	0	0	0
4	15.0	82	155	50	36	0.35	5.6	—	—	3.15	102	14.8	4.8	8.1	0	0	195	39.0	0	0	0
7	14.0	52	98	51	37	1.8	29	—	—	0.76	25	33.6	32	5.4	2	5.6	930	186	0	0	0
8	11.4	43	85	36	26	3.7	59	0.21	76	0.76	34	11.7	10	1.7	18	51	1600	320	0	0	0
9	10.0	75	73	55	39	7.7	123	—	—	0.57	52	60.0	21	3.6	25	70	960	192	0	0	0
10	9.0	131	70	92	66	12.8	204	—	—	0.95	43	24.6	8	0.14	16	45	840	169	0	0	0
11	8.5	62	54	87	63	9.6	151	—	—	1.26	41	—	4	0.07	3	8.4	520	104	0	0	0
12	7.7	220	41	90	65	16.5	263	—	—	3.91	125	25.6	18	3.1	104	87	210	42	0	0	0
13	7.1	260	29	75	54	—	—	—	—	2.26	72	—	40	6.8	116	97	116	23.2	0	0	1
14	6.7	315	25	78	56	18.6	257	—	—	1.57	69	21.2	210	35.6	136	114	68	12.6	1	1.48	3
15	6.3	390	21	62	59	—	—	—	—	1.23	55	—	190	32.3	181	152	9	1.8	1	148	4
16	5.9	326	19	62	45	3.5	56	0.12	44	1.64	74	17.2	180	30.6	230	192	0	0	2	2.8	6
18	5.6	207	17	35	25	—	—	—	—	1.45	65	—	110	18.7	61	51	0	0	3	4.3	4
20	5.2	26	12	3	2	3.2	51	—	—	5.23	236	—	84	7.6	48	48	0	0	10	14.5	5
22	5.1	15	7	1	0.7	—	—	—	—	4.81	454	13.5	26	4.4	34	28	0	0	9	15.3	2
25	4.8	10	4	0.4	0.3	2.8	45	—	—	0.67	30	—	35	5.9	25	21	0	0	3	5.1	3
30	4.5	3	0	0	0	—	—	0.09	34	0.62	27	—	12	2.0	12	10	0	0	1	1.4	12
35	4.4	2	0	0	0	0.5	8	—	—	1.92	115	—	10	1.7	5	3.4	0	0	0	0	6
40	4.3	0	0	0	0	—	—	—	—	0.75	34	5.7	0	0	3	2.5	0	0	0	0	9
48	4.1	0	0	0	0	0.1	1.6	0.06	22	0.76	46	—	0	3	0	0	0	0	0	0	22

Примечание. N — численность, B — биомасса, мг C/м³, суточная продукция, мг C/м³.

них соответствует глубине оптимума освещенности (рис. 1). Определения световых кривых K_T (рис. 2) показали, что оптимум освещенности для фотосинтеза фитопланктона находится на глубинах 3—5 м. Второй максимум формируется в верхней части термоклина (рис. 3) на глубинах 9—

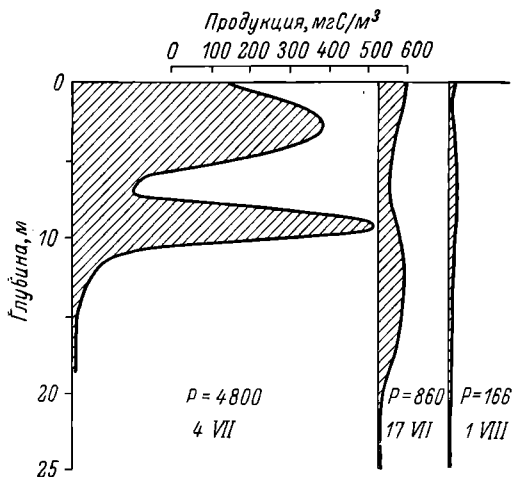


Рис. 1. Суточная продукция фотосинтеза фитопланктона в толще воды.

P — суммарная продукция под 1 м², мг С.

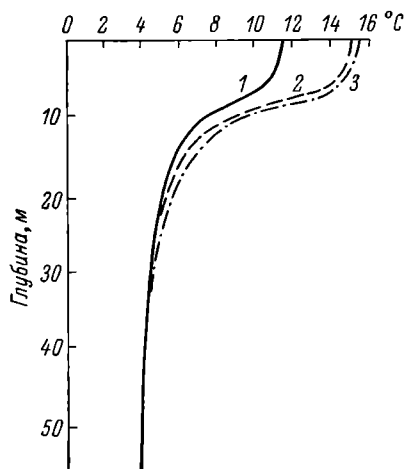


Рис. 3. Распределение температуры в толще воды 4 VII (1), 17 VII (2) и 1 VIII (3).

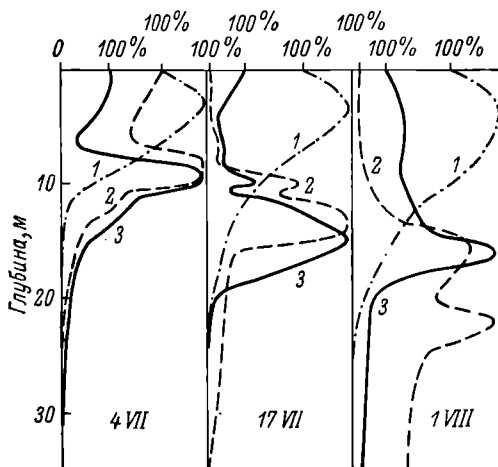


Рис. 2. Параметры, характеризующие фитопланктон.

1 — толщина евфотической зоны (K_T); 2 — относительное распределение активного фитопланктона (K_p); 3 — общая численность фитопланктона (N).

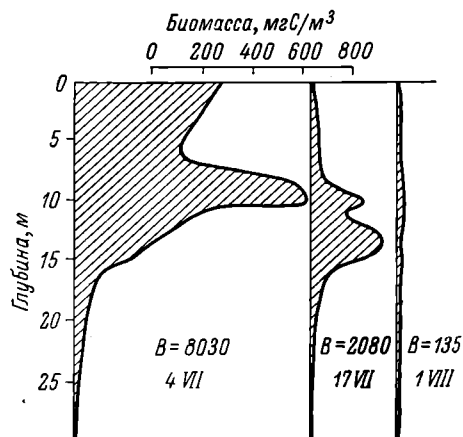


Рис. 4. Биомасса фитопланктона в толще воды.

B — суммарная биомасса под 1 м², мг С.

11 м (рис. 1) под воздействием аккумуляции фитопланктона в этом слое (рис. 2, 4), где в первый срок наблюдений (4 июля) находилось уже более 50% активного фитопланктона. Его концентрация на глубине 9.5 м была почти в 3 раза выше, чем у поверхности. На данную глубину проникает почти $\frac{1}{3}$ физиологически активной радиации, поэтому интенсивность фотосинтеза здесь такая же, как и в слое максимума. Спустя 2 недели фитопланктон практически полностью исчез из поверхностного слоя и вегетировал лишь в зоне скачка (рис. 2). При этом максимум его наблю-

дался на глубине 14.5 м, куда проникает всего 20% физиологически активной радиации. Абсолютная концентрация фитопланктона снизилась в слое максимума в 3 раза, а продукция под 1 м² — в 5 раз и составила 860 мг С/м² в сутки. Спустя еще 10 дней, в конце месяца, фитопланктон практически исчез из водной толщи выше 15 м. Некоторое количество живого фитопланктона оставалось только в слое 15–25 м, куда проникает лишь малая доля активной радиации. Продукция под 1 м² уменьшилась при этом значительно — до 166 мг С/м² в сутки, что вдвое ниже средней продукции фотосинтеза в олиготрофных водоемах.

Толщина зоны фотосинтеза, которая характеризуется кривыми K_T (рис. 2), в период максимума цветения в начале июля составляет 12 м.

На нее оказывает влияние самозатенение водорослей, скапливающихся в верхней части

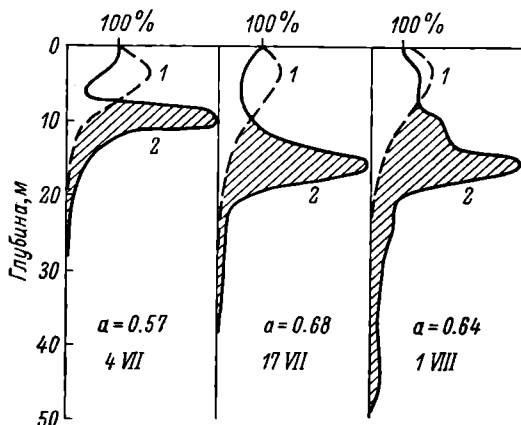


Рис. 5. Степень светового голодания фитопланктона (a).

Заштрихованная площадь соответствует относительному количеству активного фитопланктона, испытывающему световое голодание. 1 — K_T ; 2 — K_p .

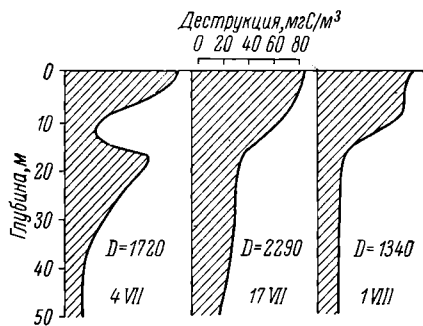


Рис. 6. Суточная деструкция в толще воды.

D — суммарная деструкция под 1 м², мг С.

термоклина. По мере их отмирания прозрачность воды возрастает и толщина слоя фотосинтеза увеличивается почти вдвое при одновременном снижении продукции под 1 м² в 30 раз.

Сопоставляя кривые K_p и N (рис. 2), можно составить определенное представление об изменениях соотношения живого и мертвого фитопланктона в период максимума цветения и в ходе его отмирания. Действительно, превышение относительной величины N над K_p должно показать количество неактивного фитопланктона. В период интенсивного цветения, когда уже началось скопление фитопланктона, над термоклином наметилось расхождение кривых в эпилимнионе. Это указывает на начавшееся снижение активности фитопланктона в верхнем его слое ввиду истощения биогенов и объясняет появление второго максимума у верхней границы термоклина. Оседающий сверху фитопланктон находит здесь еще достаточно света и биогенов, и его активность сохраняется на достаточно высоком уровне.

В период затухания цветения водорослей (рис. 2, 4) наибольшее скопление малоактивного фитопланктона (пустые створки в число N не включались) наблюдалось ниже 20 м в затемненной зоне гипolimниона, куда оседают отмирающие клетки.

Биомасса фитопланктона в период интенсивного цветения *Stephanodiscus* в слоях максимумов его концентрации достигала очень высоких для мезотрофного озера величин — 10 г/м³. В расчете на 1 м² она превышала 100 г. По мере отмирания фитопланктона в конце июля его биомасса снизилась в 30 раз. Суточные коэффициенты P/V фитопланктона коле-

бались от 0.4 до 0.6. Сравнительно небольшая их величина связана, по-видимому, с низкими температурами воды в озере и со световым голоданием, вызванным постоянным пребыванием основной массы фитопланктона на значительной глубине в условиях низкой освещенности (рис. 5). По данным Е. М. Крохина (1968а), среднесуточная продукция фитопланктона озера и его средняя биомасса, рассчитанные по результатам измерения содержания хлорофилла, составляют соответственно 1.6 и 1.3 г С/м². Указанные величины, видимо, следует считать завышенными, поскольку при использовании хлорофилльного метода частично учитывается и «мертвый» хлорофилл, которого в водоеме особенно много в периоды отмирания фитопланктона.

Соотношение между деструкцией (рис. 6) и первичной продукцией (табл. 2) изменилось за период наблюдений от 0.36 в начале июля до 8 в конце июля, в период отмирания фитопланктона. В период интенсивного развития водорослей в начале июля около $\frac{2}{3}$ потребленного кислорода расходуется в процессе метаболизма самого фитопланктона. После его отмирания (в конце июля) основную роль в процессах потребления кислорода стали играть бактерии, активность которых в этот период значительно возросла.

Биомасса и продукция бактериопланктона

Вертикальное распределение биомассы и продукции бактериопланктона в толще воды озера характеризовалось слоистостью (рис. 7, 8). При этом слои максимальной продукции не всегда соответствовали максимальной биомассе. В период массового цветения водорослей в начале месяца величины биомассы и продукции бактерий в верхнем слое воды были наименьшими. Этот эффект связан, очевидно, с конкуренцией водорослей и бактерий за растворенное органическое вещество, которое потребляют также и водоросли. В ходе отмирания фитопланктона биомасса и про-

Таблица 2

Суммарная суточная продукция (Р) и биомасса (В) организмов (ккал./м²)

Дата	Деструкция (Д)		Фитопланктон			Бактериопланктон			Простейшие			Наутилюсы			Аспланхна			Диаптотусы			Циклопы		
	Д	Д/Р	Р	В	Р/В	Р	В	Р/В	Р	В	Р/В	Р	В	Р/В	Р	В	Р/В	Р	В	Р/В	Р	В	Р/В
3—5 VII	16.0	0.36	44.5	74.6	0.59	3.56	22.2	0.16	0.71	2.35	0.30	0.003	0.085	0.003	0.077	0.64	0.12	0.046	1.64	0.028	0.80	24.1	0.033
16—18 VII	21.3	2.7	8.0	19.0	0.42	7.25	42.6	0.17	5.25	18.1	0.29	0.006	0.17	0.033	1.51	1.51	0.10	0.025	0.91	0.028	0.29	9.2	0.031
31 VII—1 VIII	12.5	8.1	1.55	1.25	1.24	8.85	32.8	0.27	2.78	16.3	0.17	0.07	1.93	0.035	0.55	6.80	0.08	0.035	1.24	0.027	0.25	8.2	0.030
Суммарные средние ¹	530	1.1	468	28.3	0.55	202	36.0	0.19	104	12.2	0.28	0.74	0.73	0.034	33.2	11.02	0.10	1.02	1.12	0.028	11.8	12.3	0.032

¹ Величины продукции — суммарные за месяц под 1 м²; величины биомассы — среднесуточные.

дукция бактерий значительно возросли, и в конце месяца суммарная продукция бактерий увеличилась более чем вдвое, при этом значительно возросли размеры клеток. Биомасса бактерий в толще воды колебалась в пределах 1—4 г/м³, а ее продукция — в пределах 0.2—0.8 мг/м³. Среднесуточный коэффициент Р/В составил для всего бактериопланктона 0.2. Соотношение между продукцией бактерий под 1 м² и деструкцией в период

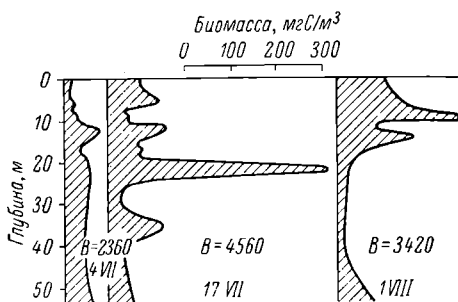


Рис. 7. Биомасса бактерий в толще воды. Обозначения те же, что на рис. 4.

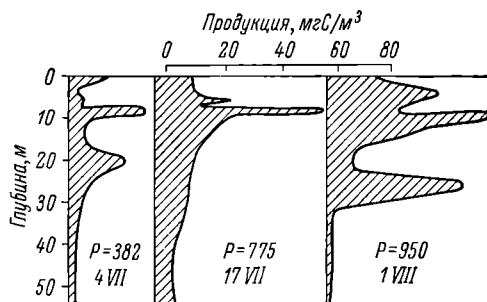


Рис. 8. Продукция бактерий в толще воды. Обозначения те же, что на рис. 1.

отмирания фитопланктона в середине июля, когда деструкция протекает преимущественно за счет метаболизма бактерий, оказалось равным 0.34. Исходя из этого соотношения, можно рассчитать коэффициент использования пищи для биосинтеза естественным бактериопланктоном:

$K_1 = \frac{0.34 \cdot 100}{1.34} = 25.4$. Аналогичная величина была получена нами в опытах по прямому определению этого коэффициента для морского бактериопланктона (Сорокин, 1970).

Найденное соотношение «деструкция — продукция бактерий» после перевода его в более удобную для расчетов форму (Д, мг О₂ соответствует 1.3 мг сырой биомассы) может быть использовано для ориентировочных расчетов продукции бактериальной биомассы в водоемах по величинам суточной деструкции.

Простейшие

Жгутиковые и простейшие составляют существенный компонент планктона озера. Максимального развития они достигают в период отмирания фитопланктона и максимального развития бактерий. Весьма характерно, что простейшие развиваются лишь в определенных слоях воды (рис. 9, 10), где их биомасса достигает почти 3 г/м³, что близко к суммарной максимальной биомассе остального зоопланктона, включая аспланхну даже в период ее массового развития. Жгутиковые развиваются в начале июля в поверхностном слое воды. Затем максимум их концентрации перемещается вслед за опускающимся максимумом отмирающего фитопланктона. Они представлены бесцветными клетками размером 8—12 мк. Максимум численности жгутиковых (750 в 1 мл) был отмечен на глубине 18 м в начале августа. Их биомасса достигала здесь 2.5 г/м³. Инфузории в период цветения водорослей были найдены в небольшом числе на глубине 14—18 м. Они представлены одним видом *Tintinnopsis* sp. В середине месяца на глубине 10 м на месте бывшего максимума концентрации водорослей появился слой значительной концентрации этой инфузории. На глубинах 16—18 м образовался второй слой максимума, где численность инфузورий другого вида (*Strombidium* sp.) достигла 230 в 1 мл и биомасса — 1.9 г/м³. В конце месяца инфузории *Tintinnopsis* остались в небольшом количестве на глубине 11 м. Снижение численности инфузورий произошло

также и в слое их второго максимума на глубине 18 м. Уменьшение численности инфузорий в этот период, несомненно, связано с их выеданием хищной коловраткой — аспланхной, массовое развитие которой наблю-

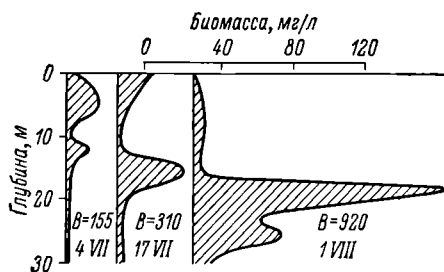


Рис. 9. Биомасса жгутиковых в толще воды.

Обозначения те же, что на рис. 4.

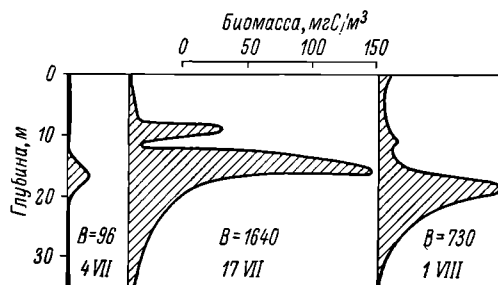


Рис. 10. Биомасса аспланхны в толще воды.

Обозначения те же, что на рис. 4.

далось в это же время на тех же глубинах, а также циклопами, которые по мере их перехода во взрослую стадию начинают питаться животным кормом (Павельева и Сорокин, 1974).

Хищные коловратки (*Asplanchna*)

Помимо интенсивного развития бактерий и простейших период отмирания фитопланктона характеризовался еще одним существенным явлением в жизни водоема. В озере начиная с 10 июля началось массовое развитие хищной коловратки *Asplanchna priodonta*. В середине месяца на глубине 8 м численность этой крупной коловратки достигла огромной величины — 1600 в 1 л, а биомасса — 20 г/м³ (в слое максимума). Массовое ее скопление отмечалось в слое толщиной всего 4 м. В конце месяца слой скопления аспланхны опустился на глубину 16 м. Слой максимальной концентрации коловраток и их перемещение хорошо совпадали с динамикой вертикального распределения инфузорий, которые составляют основную пищу аспланхны.

Науплиусы

Науплиусы появляются в значительном количестве лишь в конце июля, когда созревает популяция циклопов (рис. 11). Они также образуют скопление в узком слое толщиной 5 м на глубинах 14—19 м, соответствующем слою максимального развития инфузорий. Их численность достигает здесь значительной величины — 140 экз./л.

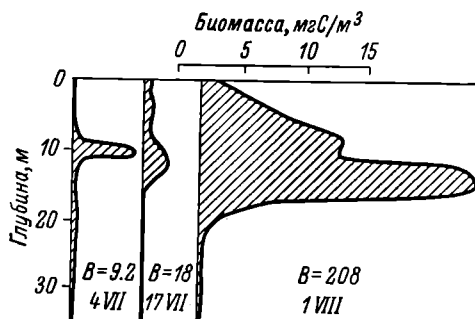


Рис. 11. Биомасса науплиусов в толще воды.

Обозначения те же, что на рис. 4.

Диаптомусы (*Neutrodiaptomus angustilobus*)

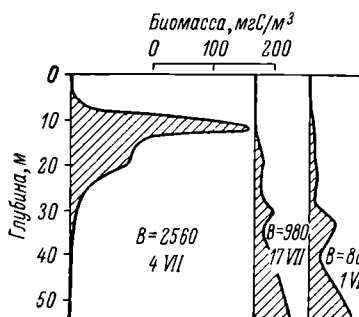
В начале июля популяция диаптомусов существует в основном в виде последних копепоидных стадий, которые концентрируются в слое 10—18 м непосредственно под слоем максимума концентрации водорослей.

Обозначения те же, что на рис. 4.

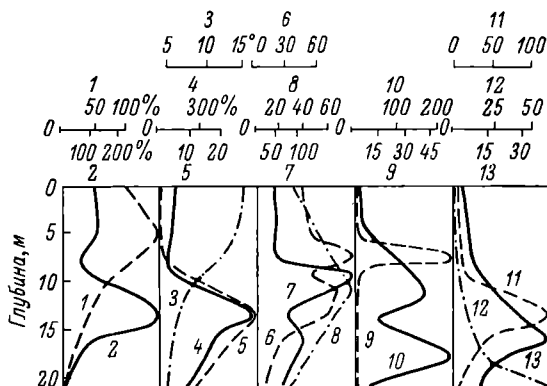
Рис. 13. Суточные вертикальные миграции зоопланктона в озере на центральной станции 1 VIII 1969 в 19—21 час. (1) и в 0 час. 6 мин.—0 час. 20 мин. (2).

I — циклопы; *II* — науплиусы; *III* — диатомусы; *IV* — аспланхна. Цифры против максимумов на кривых показывают максимальную численность, экз./м³.

Так же как и диаптомусы, циклопы в начале месяца были представлены копеподами последних стадий и концентрировались непосредственно в слое нижнего максимума фитопланктона на глубинах 8—12 м (рис. 1).



Обозначения те же, что на рис. 4.



B — биомасса, мг С/м³; P — продукция, мг С/м³ в сутки.
 1 — фотосинтез (K_F); 2 — то же (K_C); 3 — температура;
 4 — фотосинтез (K_F); 5 — фитопланктон (B); 6 — бак-
 териопланктон (P); 7 — биомасса бактериопланктона (B);
 8 — деструкция, мг С/м³; 9 — жгутиковые (B); 10 —
 инфузории (B); 11 — асplanкна (B); 12 — циклопы (B);
 13 — диапомусы (B).

32

С середины месяца циклопы переходят во взрослую стадию и начинают мигрировать в течение суток (Кожевников, 1968). Днем популяция циклопов находится на значительной глубине, и максимум ее численности отмечается в придонном слое на глубинах 48—54 м (рис. 14). Ночью они поднимаются в верхние слои, где кормом для них служит животная пища: молодь аспланхны, науплиусы, простейшие и диаптомиды (Павельева и Сорокин, 1971). Биомасса циклопов максимальна в начале месяца (20 г/м^2); в конце месяца она снижается вдвое за счет снижения численности, хотя индивидуальный вес возрастает с 30 до 50 мкг. Среднемесячная биомасса циклопов была в 7 раз ниже среднегодовой (Крогиус и др., 1969).

Структура экосистемы пелагиали вблизи берега

Чтобы выяснить, в какой степени распространяется описанная выше структура экосистемы озера на все озеро, мы выполнили 20 июля вертикальный разрез на станции, расположенной вблизи берега над свалом дна на глубине 21 м. Результаты определений представлены на рис. 15. Они свидетельствуют об однородности структуры экосистемы в пределах всей массы озера (исключая, конечно, мелководье, площадь которого в озере невелика). Действительно, для данной прибрежной станции, так же как и для центральной, характерно слоистое распределение планктонных организмов в толще воды. При этом глубины залегания отдельных слоев на этих станциях достаточно хорошо коррелируют между собой. Для прибрежной станции характерна лишь некоторая их размытость по вертикали, которая вызывается, вероятно, действием внутренних волн, усиливающихся вблизи берегов (Крохин, 1965).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из представленных материалов, подробное обследование вертикального распределения отдельных групп организмов выявило структуру экосистемы озера. Существовало, что аналогичная слоистость была обнаружена и в экосистеме тропических вод Мирового океана (Гиттельзон и др., 1969; Сорокин, 1959). Раскрытие механизма ее образования, причин стабильности и вертикального перемещения является ключом к пониманию важнейших вопросов трофодинамики. В качестве рабочей гипотезы можно принять предложение, что одной из первоначальных причин формирования слоистой структуры является физическая стратификация самой водной толщи в пределах евфотической зоны и связанное с ней формирование слоя повышенной концентрации фитопланктона у верхней границы термоклина. Исследования фитопланктона в умеренных и тропических водах Мирового океана показали, что в условиях гомотермии слоистость в распределении фитопланктона отсутствует (рис. 16). При прогреве верхнего слоя тропических вод и появлении стабильного в пределах освещенной зоны термоклина у верхней его границы формируется слой повышенной концентрации фитопланктона. Вблизи дивергенции, когда

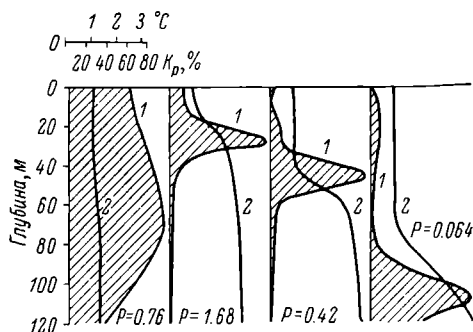


Рис. 16. Вертикальное распределение активного фитопланктона (K_p) в стратификации евфотического слоя на разрезе Канарские о-ва—Зеленый мыс—Саргассово море (Атлантика, 1958 г.; по Сорокину, 1959).

1 — K_p ; 2 — температура. Остальные обозначения те же, что на рис. 1.

С середины месяца циклопы переходят во взрослую стадию и начинают мигрировать в течение суток (Кожевников, 1968). Днем популяция циклопов находится на значительной глубине, и максимум ее численности отмечается в придонном слое на глубинах 48—54 м (рис. 14). Ночью они поднимаются в верхние слои, где кормом для них служит животная пища: молодь аспланхны, науплиусы, простейшие и диаптомиды (Павельева и Сорокин, 1971). Биомасса циклопов максимальна в начале месяца (20 г/м^2); в конце месяца она снижается вдвое за счет снижения численности, хотя индивидуальный вес возрастает с 30 до 50 мкг. Среднемесячная биомасса циклопов была в 7 раз ниже среднемноголетней (Крогиус и др., 1969).

Структура экосистемы пелагиали вблизи берега

Чтобы выяснить, в какой степени распространяется описанная выше структура экосистемы озера на все озеро, мы выполнили 20 июля вертикальный разрез на станции, расположенной вблизи берега над свалом дна на глубине 21 м. Результаты определений представлены на рис. 15. Они свидетельствуют об однородности структуры экосистемы в пределах всей массы озера (исключая, конечно, мелководье, площадь которого в озере невелика). Действительно, для данной прибрежной станции, так же как и для центральной, характерно слоистое распределение планктонных организмов в толще воды. При этом глубины залегания отдельных слоев на этих станциях достаточно хорошо коррелируют между собой. Для прибрежной станции характерна лишь некоторая их размытость по вертикали, которая вызывается, вероятно, действием внутренних волн, усиливающихся вблизи берегов (Крохин, 1965).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как видно из представленных материалов, подробное обследование вертикального распределения отдельных групп организмов выявило структуру экосистемы озера. Существенно, что аналогичная слоистость была обнаружена и в экосистеме тропических вод Мирового океана (Гиттельзон и др., 1969; Сорокин, 1959). Раскрытие механизма ее образования, причин стабильности и вертикального перемещения является ключом к пониманию важнейших вопросов трофодинамики. В качестве рабочей гипотезы можно принять предложение, что одной из первопричин формирования слоистой структуры является физическая стратификация самой водной толщи в пределах евфотической зоны и связанное с ней формирование слоя повышенной концентрации фитопланктона у верхней границы термоклина. Исследования фитопланктона в умеренных и тропических водах Мирового океана показали, что в условиях гомотермии слоистость в распределении фитопланктона отсутствует (рис. 16). При прогреве верхнего слоя тропических вод и появлении стабильного в пределах освещенной зоны термоклина у верхней его границы формируется слой повышенной концентрации фитопланктона. Вблизи дивергенции, когда

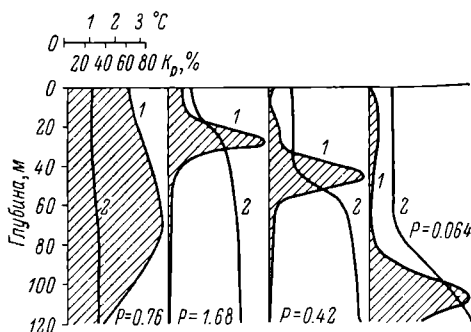


Рис. 16. Вертикальное распределение активного фитопланктона (K_p) в стратификации евфотического слоя на разрезе Канарские о-ва—Зеленый мыс—Саргассово море (Атлантика, 1958 г.; по Сорокину, 1959).

1 — K_p ; 2 — температура. Остальные обозначения те же, что на рис. 1.

в эпилимнионе биогены еще до конца не использованы, распределение фитопланктона аналогично распространению его в оз. Дальнем в период интенсивного цветения *Stephanodiscus* в условиях стабилизации термоклина (начало июля). В этих условиях часть фитопланктона находится в толще эпилимниона и уже начинает формироваться мощный слой фитопланктона у границы термоклина.

С течением времени воды эпилимниона «стареют». Это выражается в обеднении их биогенами, попавшими сюда в период гомотермии (Крохин, 1948; Кругиус и Крохин, 1948). Эти биогены интенсивно потребляются фитопланктоном в период его массового весеннего цветения. Клетки отмирающего фитопланктона оседают глубже формирующегося термоклина и выносят биогены за пределы евфотической зоны. По мере «старения» вод эпилимниона основным путем поступления биогенов в евфотическую зону становится их перемещение через термоклин за счет турбулентного обмена и внутренних вод. Поскольку верхняя граница термоклина, как правило, лежит в пределах освещенной зоны, популяция фитопланктона, обитающая у его верхней границы, находится в наиболее выгодных условиях. Она получает снизу некоторое количество биогенов и сверху определенное количество световой энергии. Эта популяция и образует стабильный слой фитопланктона, который прослеживается как в морях и океанах (Сорокин, 1959; Семина, 1967), так и в озерах (Сорокин, 1968). При этом часто в толще воды самого эпилимниона выше слоя скачка фитопланктон практически отсутствует (рис. 17). Прогрев вод эпилимниона сопровождается также опусканием верхней границы термоклина в зону меньшей освещенности при одновременном росте градиентов, разделяющих эпилимнион и гипolimнион. Вследствие этого приток биогенов снизу становится меньше. Таким образом, и освещенность слоя развития фитопланктона, и интенсивность поступления в него биогенов падают. Сам слой вследствие этого становится тоньше, и продукция фотосинтеза под 1 м^2 падает. Эти явления очень четко выражены в тропических водах Мирового океана в пространстве. В направлении от дивергенций к конвергенциям происходит опускание верхней границы термоклина, рост градиентов температуры в нем, «старение» поверхностных вод эпилимниона и превращение вод из евтрофных вблизи дивергенций в олиготрофные вблизи конвергенций.

В озере эти явления развивались от периода гомотермии (середина июня) к периоду стабилизации термоклина и максимального цветения фитопланктона (начало июля) и далее к периоду «старения» вод эпилимниона. Все эти явления приводят к снижению продукции фитопланктона в течение июля в 30 раз и к отмиранию водорослей *Stephanodiscus*. Сходство механизмов, регулирующих продукцию фитопланктона и вертикальную структуру его популяций в океане и в озере, позволяет ставить вопрос о создании кибернетических моделей на примере озера с тем, чтобы применить их в дальнейшем для исследования аналогичных явлений, регулирующих первичную продуктивность океанов.

Важное значение в обеспечении стабильности слоев играет повышенная устойчивость самой водной массы в слое термоклина. Она, в частности, задерживает погружение фитопланктона и других организмов и способствует их аккумуляции на определенных глубинах. В условиях повышенной стабильности водной массы образуются своеобразные слои — биоценозы, в которых снижаются затраты организмами энергии на парение. Наряду с этим существование в водоеме слоя повышенной концентрации основных продуцентов первопищи — фитопланктона и бактериопланктона — не может в свою очередь не влиять на структуру экосистемы. В начале июля в период существования мощного слоя фитопланктона в верхней части термоклина в этом слое скапливается почти вся популяция копепоидитов

Таблица 3

Сравнение кислородного и радиоуглеродного методов
измерения фотосинтеза

Радиоуглеродный метод		Кислородный метод		А/Б, %
фотосинтез		чистая продукция, мг О ₂ /л (Б)	валовая продукция, мг О ₂ /л	
мг С/л	мг О ₂ /л (А)			
0.121	0.34	0.30	0.46	113
0.365	1.03	0.95	1.24	109
0.217	0.77	0.82	1.05	93

Таблица 4

Трансформация энергии на разных трофических уровнях в планктонном сообществе оз. Дальнего в июле, ккал./м² за 30 дней

Номер уровня	Организмы- продуценты	Источник питания (энергии)	Б	Р	П/Б	П/А	Т	А	Р
1	Аллохтонная органика Фитопланктон	Сток с суши	—	250	—	—	—	—	—
		Свет	28.5	468	16.4	—	117	585	—
2а	Бактериоплан- ктон То же » »	Аллохтонная ор- ганика	13.4	74	5.5	0.3	175	250	250
		Фитопланктон	19.0	105	5.5	0.3	245	350	350
		Детрит	4.1	23	5.5	0.3	45	74.5	74.5
2б	Сумма		—	202	—	—	465	674.5	674.5
	Циклопы (ко- пеподиты)	Фитопланктон	6.1	5.8	0.96	0.56	4.5	10.3	11.5
	Диатомусы	»	0.62	0.56	1.1	0.70	0.24	0.80	1.0
	Науплиусы	»	0.56	0.54	0.96	0.56	0.43	1.0	1.2
	Простейшие	»	1.2	9.0	6.7	0.5	9.0	18	22.5
2в	Сумма		—	15.9	9.72	—	14.17	—	36.2
	Простейшие	Бактериопланк- тон	12	80	6.7	0.5	80	160	198
	Диатомусы	То же	0.50	0.55	1.1	0.7	0.25	0.8	1.0
3	Сумма		—	80.55	—	—	80.25	—	199
	Циклопы	Растительнойд- ный зоопланк- тон	6.2	6.0	0.96	0.56	4.7	10.7	12.0
	Аспланхна	То же	9.8	30.5	3.1	0.66	15.7	46.2	64.2
	Молодь рыб	» »	4.0	2.0	0.5	0.5	2.0	4.0	5.3
4	Сумма		—	38.5	—	—	24.4	—	81.5
	Молодь рыб	Хищный зооплан- ктон	9.2	4.6	0.5	0.5	4.6	9.2	12.2

циклопов, питающихся водорослями. Существование бактериальных слоев и возникающих вслед за ними слоев концентрации простейших связано с опусканием слоя отмирающего фитопланктона и аккумуляцией детрита в зонах определенного градиента плотности. Формирование слоев скопления аспланхны обусловлено слоистым распределением ее пищи — простейших. Положение слоя концентрации копеподитов диаптомусов

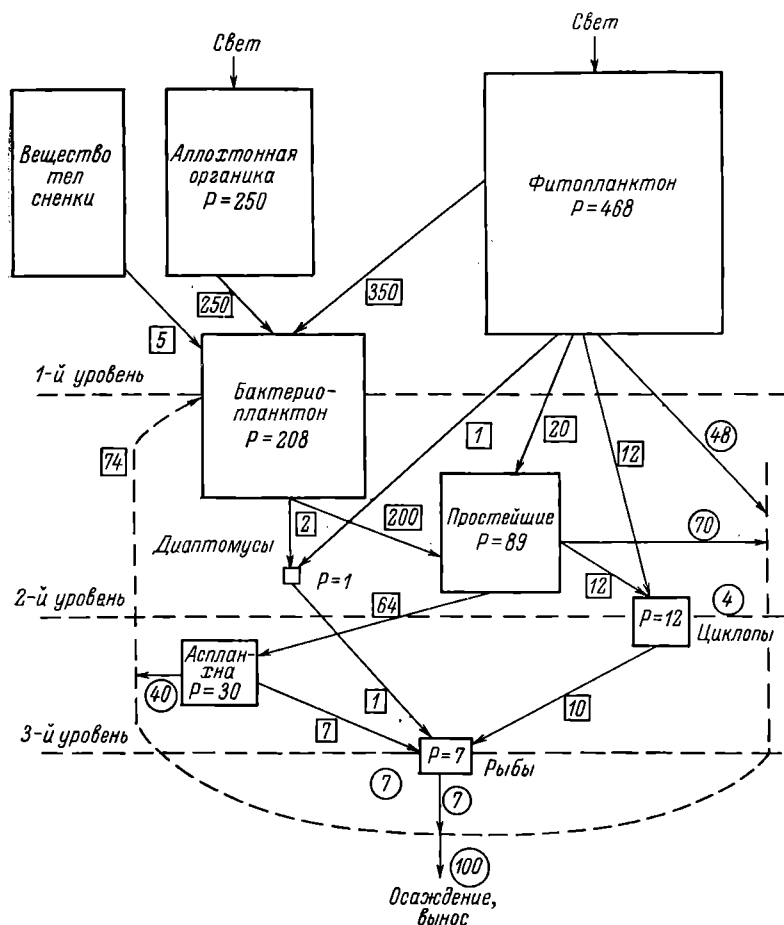


Рис. 17. Схема потоков энергии в экосистеме озера (кал./м² за 30 дней (июль)).

P — продукция. Цифры в квадратах — рацион, цифры в кругах — неусвоенная часть рациона.

(16—20 м) связано с тем, что последние, являясь более тонкими фильтра-торами, чем копеподиты циклопов, не нуждаются в столь высокой кон-центрации пищи, какая преобладает в слое максимума фитопланктона. На этой глубине они находят достаточно пищи и в то же время избегают выедания их рыбами. Распределение взрослых форм циклопов и старших стадий диаптомусов связано с реакцией избегания выедания их рыбами-планктофагами, которая проявляется в их вертикальных миграциях. Слои их скопления образуются при этом только ночью.

На основании полученных материалов были рассчитаны средняя биомасса всех групп организмов пелагиали озера и их продукция за июль (табл. 2). При этом продукцию фитопланктона принимали равной чистой продукции на основании сравнения результатов опытов, выполненных

кислородным и радиоуглеродным методами (табл. 3). При наличии данных, характеризующих среднемесячную и месячную биомассу и продукцию организмов на всех трофических уровнях, была сделана попытка составления ориентировочной схемы структуры экосистемы пелагиали озера (табл. 4; рис. 17). Эта схема является развитием аналогичных схем, составленных Г. Г. Винбергом (1969) для оз. Дривяты и Е. М. Крохиным (1969) для оз. Дальнего на основе многолетних данных. Мы сочли возможным представить ее в настоящей работе, поскольку она содержит некоторые принципиальные особенности, которые базируются на новых данных. Эта схема может помочь при дальнейшей разработке проблемы. При составлении табл. 4 принималось, что первичная продукция (1-й уровень) включает продукцию органического вещества за счет внешних источников энергии — солнечной энергии и энергии аллохтонного органического вещества, реализуемой в водоеме через бактериальное звено. Величину последней вычисляли, вычитая из величины суммарной деструкции величину продукции фитопланктона, подвергающегося бактериальному распаду (70%). Коэффициент K_2 для бактериопланктона (0.3) был найден экспериментальным путем (Сорокин, 1974). Циклопы были отнесены к двум разным уровням (2-му и 3-му), поскольку в течение первой половины месяца, будучи в стадии копеподитов, они питались водорослями, а со второй половины месяца перешли на питание животным кормом (Павельева и Сорокин, 1974). В том же сообщении представлены результаты балансовых опытов, на основании которых были получены коэффициенты K_2 и величины усвояемости. Величины биомассы и продукции рыб (молоди красной и колюшки) были взяты из работы Ф. В. Крогиус (1969). При этом популяция молоди рыб была разделена между 3-м и 4-м уровнями ввиду того, что она питается как растительным, так и хищным зоопланктоном.

Продукционная характеристика и поток энергии в экосистеме озера, полученные для июля, показывают, что первичные пищевые ресурсы озера на $\frac{1}{3}$ создаются за счет аллохтонной органики. Поэтому ее необходимо учитывать при составлении энергетического баланса озер. Далее из таблицы следует, что первичная продукция достаточно полно используется организмами 2-го трофического уровня, причем важнейшую роль в ее утилизации играют простейшие, продукция которых почти в 10 раз выше продукции растительного зоопланктона. В использовании энергии 2-го уровня основную роль играет не рачковый зоопланктон и молодь рыб, а хищная коловратка *Asplanchna*. Она в свою очередь используется в пищу молодь рыб (Павельева и Сорокин, 1974).

ВЫВОДЫ

1. Исследовалась структура экосистемы оз. Дальнего и продукционные характеристики отдельных ее компонентов. Продукция фотосинтеза фитопланктона в период массового цветения *Stephanodiscus* (начало июля) составляла 4.8 г С/м^2 , снижаясь в конце месяца в 30 раз. Максимальная биомасса фитопланктона достигала 8 г/м^3 , снижаясь в конце месяца в 60 раз.

2. Биомасса и продукция бактериопланктона по мере отмирания фитопланктона возрастала в 2 раза. Нарастание биомассы бактериопланктона сопровождалось массовым развитием простейших, максимальная биомасса которых достигала 2 г/м^3 . Вслед за появлением простейших в массовом количестве развивается хищная коловратка *Asplanchna*, которая питается простейшими. Ее максимальная биомасса составляла 20 г/м^3 .

3. Популяция *Serperoda* существует в начале июля в основном виде копеподитов. Взрослые циклопы и диапомусы, появляющиеся в массе

во второй половине июля, совершают вертикальные миграции. Их максимальная биомасса наблюдалась в начале июля и достигала 3 г/м³.

4. Изучена слоистость структуры экосистемы и обсуждены причины ее возникновения в стратифицированных водоемах.

5. Полученные данные использованы для ориентировочных расчетов потока энергии в экосистеме озера в течение июля в первую фазу вегетационного периода.

В заключение авторы приносят глубокую благодарность Ф. В. Крогиус и Е. М. Крохину за содействие в выполнении этой работы.

ЛИТЕРАТУРА

- Винберг Г. Г. 1969. Поток энергии в экосистеме эвтрофного озера. ДАН СССР, т. 186, № 1.
- Гительзон И. И., Л. А. Левин, В. С. Филимонов, А. П. Шевырных, Р. Н. Утюшев, А. С. Артемкин. 1969. Биоломинесценция тропического планктона и его роль в изучении структуры биологических сообществ. Тезисы конф. по тропической зоне Мирового океана, М.
- Кожеников Б. П. 1968. К вопросу о суточных вертикальных миграциях зоопланктона оз. Дальнего. Изв. ТИНРО, т. 64.
- Крогиус Ф. В. 1969. Продукция молоди красной в озере Дальнем. Вопр. ихтиол., т. 9, вып. 6.
- Крогиус Ф. В. и Е. М. Крохин. 1948. Об урожайности молоди красной. Изв. ТИНРО, т. 28.
- Крогиус Ф. В., Е. М. Крохин, И. И. Куренков, В. В. Меншуткин. 1969. Математическая модель экосистемы оз. Дальнего. Гидробиол. журн., № 5.
- Крогиус Ф. В., Е. М. Крохин, В. В. Меншуткин. 1969. Сообщество пелагических рыб озера Дальнего (опыт кибернетического моделирования). Л.
- Крохин Е. М. 1948. Паратунские озера. Докт. дисс. Инст. геогр. АН СССР, М.
- Крохин Е. М. 1957. Определение суточных пищевых рационов молоди красной и трехиглой колюшки респирационным методом. Изв. ТИНРО, т. 44.
- Крохин Е. М. 1960. Возникновение слоя температурного скачка в озерах. Изв. АН СССР, сер. геогр., № 6.
- Крохин Е. М. 1965. О внутренних волнах в озерах. Тр. Лимнол. инст. СО АН СССР, т. 6 (26).
- Крохин Е. М. 1968а. Обзор работ, проведенных Паратунской экспериментальной лабораторией (ПЭЛ) Камчатского отделения ТИНРО. Изв. ТИНРО, т. 64.
- Крохин Е. М. 1968б. Содержание хлорофилла в воде Паратунских озер. Изв. ТИНРО, т. 64.
- Крохин Е. М. 1969. Потоки энергии в экосистеме оз. Дальнего. ДАН СССР, т. 189, № 5.
- Павельева Е. Б. и Ю. И. Сорокин. 1971. Изучение питания зоопланктона оз. Дальнего на Камчатке. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 22 (25).
- Петрова М. А., Н. А. Бочкарева, Н. В. Соколова. 1969. Биомасса и время генерации простейших в прудах и озерах Горьковской области. Второе совещ. по вопросам круговорота веществ и энергии в озерных водоемах. Тезисы докл. Листвничное на Байкале.
- Петрович П. Г. 1968. Биомасса и продукция зоопланктона разнотипных озер Нарочь, Мястро и Баторин по многолетним наблюдениям. В кн.: Методы определения продукции водных животных. Минск.
- Романенко В. И. 1964. Потенциальная способность микрофлоры иловых отложений к гетеротрофной ассимиляции углекислоты и к хемосинтезу. Микробиол., т. 33, вып. 1.
- Семина Г. Н. 1967. Фитопланктон. В кн.: Биология Тихого океана. М.
- Сорокин Ю. И. 1958. Первичная продукция органического вещества в водной толще Рыбинского водохранилища. Тр. Биол. ст. «Борок», вып. 3.
- Сорокин Ю. И. 1959. О влиянии стратификации водных масс на первичную продукцию фотосинтеза в море. Журн. общей биол., т. 20, № 6.
- Сорокин Ю. И. 1968. Первичная продукция и микробиологические процессы в озере Гек-Гель. Микробиол., т. 37, № 2.
- Сорокин Ю. И. 1971. Количественная характеристика роли бактериопланктона в биологической продуктивности вод океана. В кн.: Структура и функционирование пелагических сообществ тропических вод океана. М.
- Троицкий А. С. и Ю. И. Сорокин. 1967. К методике расчета биомассы бактерий в водоемах. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 15 (18).

Б. А. Скопинцев, А. Г. Бакулина,
Е. М. Бикбулатова, Н. А. Кудрявцева
и Н. И. Мельникова

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В ВОДЕ ВОЛГИ И ЕЕ ВОДОХРАНИЛИЩ В ИЮНЕ 1966 г. И ИЮЛЕ 1969 г.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ИЮНЕ 1966 г.

В июне 1966 г. было проведено изучение содержания органического вещества и некоторых компонентов солевого состава в воде Волги на участке от Рыбинского водохранилища до г. Куйбышева и на обратном пути, а также в воде некоторых притоков и водохранилищ.

Пробы воды отбирались по трассе судового фарватера с глубины 0.5—1.0 м от поверхности. Аналогичные определения были выполнены в единовременно отобранных пробах сточных вод некоторых коллекторов городских и производственных предприятий; пробы отбирались в каналах после очистных установок.

Местоположение пунктов отбора проб воды (станций) определялось по данным, приведенным в «Основных гидрологических характеристиках» (1966, 1967), где расчет идет от Верхневолжского бейшлота, который расположен на 702 км выше Рыбинской плотины.

На судне были определены цветность (после фильтрации через бумажный фильтр) и в натуральной воде щелочность, общая жесткость, кальций и перманганатная окисляемость. Кроме того, выпаривалась вода для определения в лаборатории Института бихроматной окисляемости и органического углерода.

Химические анализы выполнялись по методам, изложенным в соответствующем руководстве и специальных статьях (Николаева, 1953; Крылова, 1956; Драчев и др., 1960). Органический углерод определялся в 2—3 параллельных пробах (в таблицах приведены средние данные).

При определении показателей органического вещества в пробах сточных вод последние обычно разводились дистиллированной водой и на соответствующее разведение вводилась поправка. Полученные результаты приведены в табл. 1 и 2.

Минеральные соединения

Содержание изученных компонентов солевого состава, определенное в одних и тех же пунктах в повторный срок, в большинстве случаев различалось мало. Заметные отклонения в обратном рейсе найдены в водах рек Оки, Волги у сел. Кстова и Казанки, т. е. в тех пунктах, где значительно поступление сточных вод.

Т а б л и ц а 1

Содержание некоторых компонентов солевого состава и отдельные показатели органического вещества в натуральных водах Волги, ее притоков и водохранилищ в июне 1966 г. вниз от Рыбинского водохранилища

Номер станции	Пункт	Рассто- яние, км	Дата	Щелоч- ность		Жест- кость общая мг-экв./л	Каль- ций	Цвет- ность, град.	Угле- род орга- ниче- ский, мг/л	Окисляе- мость, мг О/л		Цветность Углерод органи- ческий	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод органический	Окисляе- мость бихро- матная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический
				Щелоч- ность	мг-экв./л					перманганатная	бихро- матная					
Рыбинское водохранилище																
1	Сел. Коприно		6 VI	1.29	1.64	1.22	65	12.6	13.7	34.2	5.1	1.1	2.7	40		
2	Сел. Шумерово		6 VI	1.21	1.53	1.14	60	12.1	14.1	32.8	5.0	1.6	2.7	43		
Горьковское водохранилище																
3	Нижне г. Рыбинска на 6 км	720	6 VI	1.24	1.57	1.13	50	9.6	15.1	—	5.3	1.5	—	—		
4	Нижне г. Ярославля на 3 км	804	7 VI	1.24	1.61	1.18	50	9.2	12.6	31.2	5.4	1.4	3.4	40		
5	Нижне г. Кинешмы на 5 км	993	7 VI	1.44	1.80	1.31	40	8.4	10.1	26.3	4.3	1.2	3.1	38		
6	Р. Унжа, выше устья на 15 км	1049	8 VI	1.15	1.49	1.12	60	14.4	14.4	31.2	4.2	1.0	2.2	45		
7	Выше Горьковской пло- тины на 7 км	1130	8 VI	1.07	1.34	0.96	45	11.0	10.6	34.5	4.1	1.0	3.1	31		
р. Волга																
8	Нижне г. Балахны на 3 км	1166	9 VI	1.10	1.41	1.04	45	13.0	13.8	54.2	3.5	1.6	4.2	25		
9	Р. Ока, выше устья на 10 км	1194	9 VI	2.81	4.70	3.74	35	10.6	8.4	34.5	3.3	0.8	3.2	24		
10	Нижне г. Кстова на 2 км	1214	9 VI	1.16	1.78	1.12	48	12.7	10.9	27.9	3.8	0.9	2.2	40		
11	Р. Сура, выше устья на 7 км	1357	9 VI	3.79	6.11	4.91	20	8.2	5.5	19.7	2.4	0.7	2.4	28		
12	Р. Ветлуга, выше устья на 5 км	1392	10 VI	1.13	1.19	0.89	55	12.4	13.2	37.8	4.4	1.6	3.0	35		

Таблица 1 (продолжение)

Номер стан- ции	Пункт	Рассто- яние, км	Дата	Щелоч- ность	Жест- кость общая	Каль- ций	Цвет- ность, град.	Угле- род орга- ниче- ский, мг/л	Окисляе- мость, мг О ₂ /л		Цветность Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость бихро- матная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод ор- ганический	Окисляе- мость пер- манганатная Углерод
-----------------------	-------	------------------------	------	-----------------	-------------------------	--------------	--------------------------	---	---	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

р. Волга

24	Ниже г. Куйбышева на 10 км	2029	14 VI	1.31	2.12	1.71	40	9.7	9.7	27.9	4.1	1.0	2.9	35
----	---	------	-------	------	------	------	----	-----	-----	------	-----	-----	-----	----

Содержание некоторых компонентов солевого состава и отдельные показатели органического вещества в натуральных водах Волги, ее притоков и водохранилищ в июне 1966 г. вверх от г. Куйбышева

Номер станции	Пункт	Рассто- яние, км	Дата	Щелоч- ность	Жесткость общая	Кальций		Цветность, град.	Углерод органиче- ский, мг/л	Окисле- мость пер- манганат- ная, мг О/л	Цветность	Окисляемость перманганат- ная Углерод органический
				мг-экв./л	мг-экв./л	Углерод органиче- ский						
Р ы б и н с к о е в о д о х р а н и л и щ е												
1	Сел. Коприно	..	25 VI	—	—	—	—	60	12.5	—	—	—
2	Сел. Шумерово	..	25 VI	—	—	—	—	60	11.3	—	—	—
Г о р ь к о в с к о е в о д о х р а н и л и щ е												
3	Ниже г. Рыбинска на 6 км	..	24 VI	1.30	1.64	1.20	1.20	50	10.9	12.5	4.6	1.1
4	Ниже г. Ярославля на 3 км	..	24 VI	1.28	1.65	1.18	1.18	40	10.7	12.8	3.7	1.2
4а	Выше г. Костромы на 18 км	..	862	1.31	1.71	1.21	1.21	45	10.3	10.9	4.4	1.0
5	Ниже г. Кинешмы на 5 км	..	993	1.24	1.65	1.20	1.20	50	—	11.6	—	—
5а	Против г. Юрьевца	..	1056	1.27	1.60	1.20	1.20	43	9.4	12.2	4.6	1.3
5б	Выше г. Пучежа на 2 км	..	1095	1.16	1.57	1.12	1.12	45	10.1	12.0	4.5	1.2
6а	Против г. Чкаловска	..	1124	1.24	1.58	1.15	1.15	45	10.9	11.4	4.1	1.0
р. В о л г а												
8	Ниже г. Балахны на 3 км	..	1168	1.21	1.52	1.10	1.10	45	—	12.4	—	—
9	Р. Ока, выше устья на 10 км	..	1184	21 VI	5.23	4.08	4.08	40	8.8	10.4	4.6	1.2
10	Ниже г. Кстова на 1 км	..	1213	20 VI	3.69	2.81	2.81	40	—	11.2	—	—
К у й б ы ш е в с к о е в о д о х р а н и л и щ е												
10а	Р. Керженец, выше устья на 7 км	..	1277	19 VI	1.21	1.27	0.92	90	—	13.8	—	—
13	Против г. Марьино-Посада	..	1494	18 VI	1.83	2.78	2.06	40	9.9	10.3	4.0	1.0
13а	Ниже г. Волжска на 2 км	..	1561	18 VI	1.57	2.29	1.76	40	11.0	9.7	3.6	0.9
15	Р. Казанка, выше устья на 2 км	..	1594	18 VI	2.97	6.69	5.16	25	7.9	8.9	3.2	1.1
16	Ниже г. Казани на 5 км	..	1604	17 VI	1.61	2.47	1.83	38	10.1	12.5	3.8	1.2
21	Ниже г. Ульяновска на 5 км	..	1811	16 VI	1.36	2.05	1.60	45	—	11.4	—	—
22	Залив Черемшанский	..	1876	16 VI	1.33	2.05	1.61	45	9.5	9.0	4.7	0.9
23	Выше Куйбышевской плотины на 7 км	..	1947	16 VI	1.36	2.18	1.71	40	9.7	9.7	4.1	1.0
р. В о л г а												
24	Ниже г. Куйбышева на 10 км	..	2029	15 VI	1.35	2.16	1.72	40	—	11.2	—	—

Как правило, для вод Волги и ее водохранилищ вплоть до г. Чебоксар, а также для вод левобережных притоков (за исключением р. Камы) характерна меньшая минерализация по сравнению с водами Куйбышевского водохранилища и правобережных притоков. Такая же последовательность имеется и в содержании некоторых ионов: в незагрязненных участках Волги и ее водохранилищ, вплоть до верховья Куйбышевского водохранилища и в левобережных притоках (за исключением р. Камы) содержание HCO_3^- в эквивалентном выражении преобладало над Ca^{++} . В водах загрязненных участков Волги — в водах Куйбышевского водохранилища, р. Камы и левобережных притоков — наблюдалось обратное явление. Это указывает на увеличение участия анионов сильных кислот в солевом составе указанных вод. Эти данные согласуются с результатами многочисленных исследований, выполненных А. А. Зениным (1965).

Органическое вещество

Цветность волжских вод (Волги и ее водохранилищ) по всему маршруту в обоих направлениях колебалась от 65 до 40°, причем наибольшие значения характерны для вод Рыбинского и Горьковского водохранилищ. Близкие величины получены для вод левобережных притоков. В водах правобережных притоков цветность колебалась от 20 до 35°. Соответственно этому и величины отношений цветности к органическому углероду в водах уменьшались вниз по течению Волги.

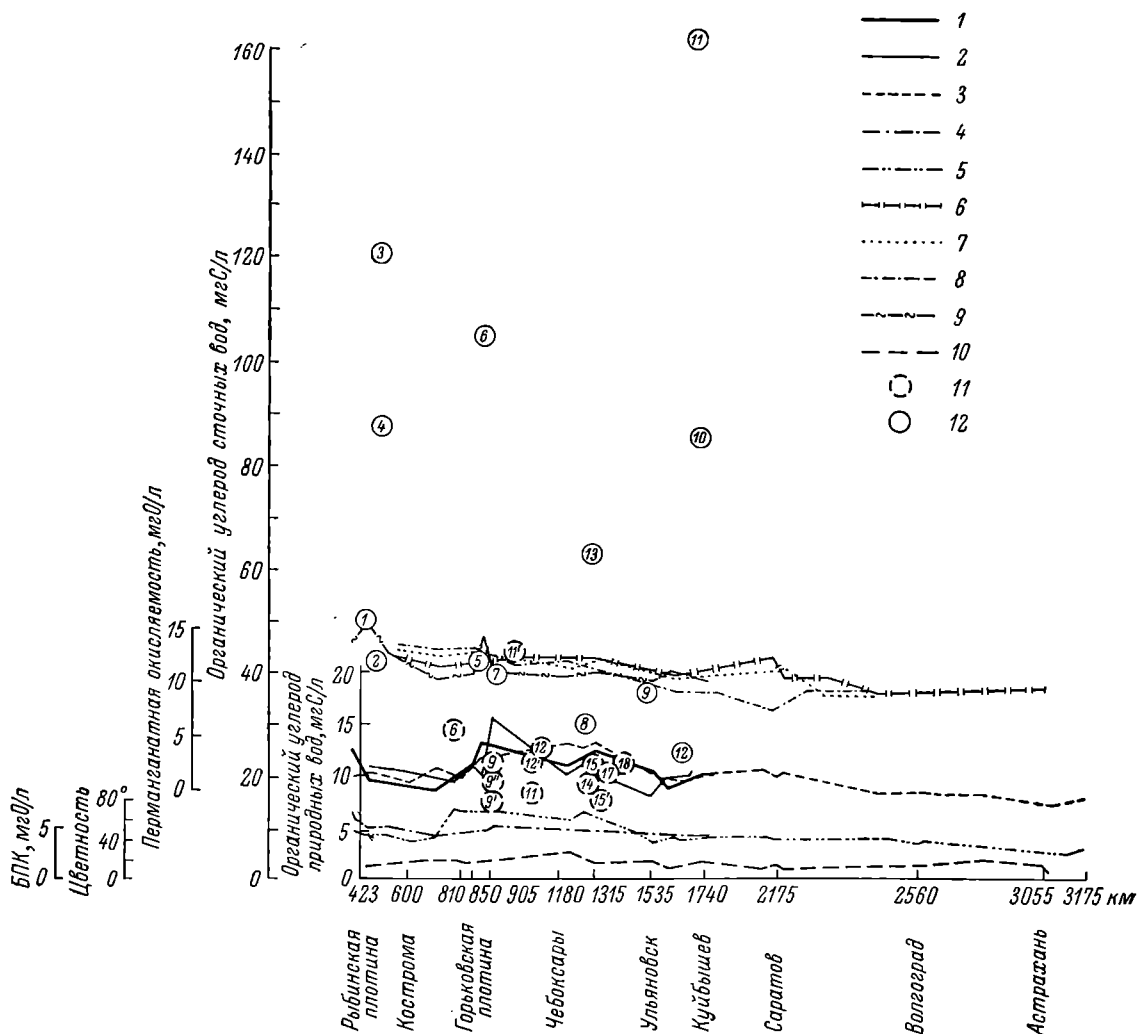
Углерод органический в сухом остатке от выпаривания воды. Крайние величины составляли 8.2—14.4 мг/л. Наибольшие значения также характерны для вод Рыбинского водохранилища и левобережных притоков. В Куйбышевском водохранилище содержание органического углерода было несколько меньше. При повторном определении (на обратном пути) количество углерода отличалось в большинстве случаев не более чем на 1 мг/л.

Окисляемость перманганатная. Величины этой характеристики колебались от 5.5 до 15.1 мг О/л. Значения, выраженные в мг О/л, в большинстве случаев были близки к содержанию органического углерода (в одних и тех же пунктах). Это подтверждается вычисленными величинами отношений кислорода перманганатной окисляемости к органическому углероду, которые обычно составляют 1.0 ± 0.2 , и лишь в редких случаях отклонение от единицы достигает ± 0.3 —0.5. Следовательно, можно полагать, что основная часть органического вещества вод большинства изученных рек и водохранилищ имеет общую природу — водный гумус терригенного происхождения.

Окисляемость бихроматная. Обычно превышала перманганатную в 2.5—3 раза. Для вод с большими значениями цветности величины отношений перманганатной окисляемости к бихроматной близки к 40%. Для других вод это отношение обычно меньше.

Весьма показательным отношением кислорода бихроматной окисляемости к органическому углероду, которое, как известно, представляет кислородный эквивалент. Для органических соединений с элементарным составом, близким к глюкозе, его величина составляет 2.66. Примерно такие же значения найдены в большинстве исследованных проб. В других пунктах они оказались (табл. 1) выше, это дает основание говорить о большей восстановленности органического вещества этих вод, особенно в пробах, взятых ниже городов Ярославля, Балахны, а также в устьях рек Оки, Ветлуги и Казанки, где, очевидно, проявляется влияние сбрасываемых сточных вод. Повышение кислородного эквивалента в воде выше Горьковской и Куйбышевской плотин, а также в Черемшанском заливе Куйбышевского водохранилища обусловлено, возможно, значительным участием органического вещества планктонного происхождения.

Для сопоставления содержания органического вещества в воде Волги и ее водохранилищ на рисунке нанесены графики распределения перманганатной окисляемости в июне 1966 г., в июле и сентябре 1954 г. и сентябре 1955 г. Последние заимствованы из работы А. А. Зенина (1965). На том же



Содержание углерода в сухом остатке от выпаривания воды в июне 1966 г. вниз по течению Волги (1), в июне 1966 г. вверх по течению Волги (2) и в июле 1969 г. (3); цветность в июне 1966 г. (4) и июле 1969 г. (5); перманганатная окисляемость в июне 1954 г. (6), сентябре 1954 г. (7), сентябре 1955 г. (8) и июне 1966 г. (9); БПК₅ в июле 1969 г. (10); содержание углерода в сухом остатке от выпаривания воды притоков в 1966—1969 гг. (11) и сточных вод в 1966 г. (12).

Масштаб для углерода в сточных водах уменьшен в 2 раза.

рисунке показано распределение цветности и органического углерода в июне 1966 г. Для притоков помещены только данные по органическому углероду (их соответствующие положения показаны штриховыми кружками). Цифры внутри кружков означают номера станций, указанных в табл. 1.

Как следует из приведенного рисунка, перманганатная окисляемость в июне 1966 г. была примерно на 1, а иногда на 2 мг О/л меньше (за исключением пункта у Горьковской плотины) по сравнению с июнем 1954 г., вплоть до г. Ульяновска. В сентябре 1954 г. ее значения близки к таковым

в июне этого же года, а в сентябре 1955 г. они заметно меньше. Таким образом, в отдельные годы перманганатная окисляемость в одних и тех же пунктах заметно отличается, но общая тенденция — понижение ее от г. Костромы вниз по течению вплоть до г. Куйбышева и далее до Волгограда и Астрахани — сохраняется. Снижение перманганатной окисляемости от г. Костромы до г. Куйбышева в 1954—1955 гг. составило 1.2—4.8 мг О/л.

В июне 1966 г. значительное понижение перманганатной окисляемости наблюдалось на участке от Рыбинского водохранилища до г. Костромы — около 3.5 мг О/л. Ниже, вплоть до г. Куйбышева, она уменьшилась примерно на 1.5 мг О/л. Таким образом, в июне 1966 г. снижение перманганатной окисляемости от г. Костромы до г. Куйбышева было меньше, чем в июне 1954 г. Характерно, что у г. Куйбышева величины перманганатной окисляемости в 1954 и 1966 гг. были близки — около 9.5 мг О/л. Очевидно, за истекшие 12 лет содержание органического вещества (по окисляемости) в воде р. Волги на трассе судового фарватера от г. Костромы до г. Куйбышева заметно не увеличилось.

Результаты определения органического вещества в сточных водах этого участка будут рассмотрены ниже.

ИССЛЕДОВАНИЯ В ИЮЛЕ 1969 г.

В июле 1969 г. на участке от Рыбинского водохранилища до г. Астрахани в судовой лаборатории впервые было проведено определение содержания в натуральной воде валового органического углерода по фотохимическому и персульфатному методам (Бикбулатова и др., 1969). Пробы воды отбирались на трассе судового фарватера в слое 0.5—1 м от поверхности. В этом случае анализ проводился непосредственно в свежееотобранных пробах без предварительного упаривания. Таким образом устранялась возможная потеря летучей фракции органического вещества. Для сравнения параллельно в тех же пробах воды определялся органический углерод в сухом остатке, по Л. П. Крыловой (1956). Были проведены также определения активной реакции (рН), щелочности и цветности. Данные по растворенному кислороду и БПК₅, полученные Е. П. Смирновой, будут рассмотрены ниже.

В июле 1969 г. рН воды Верхней и Средней Волги обычно было близко к 8.0, а в нижнем участке чаще всего составляло ≈ 8.2 (табл. 3). По сравнению с июнем 1966 г. в этот период наблюдались повышенные значения щелочности и меньшая цветность на участке от Рыбинского водохранилища до г. Кинешмы и ниже г. Ульяновска. На промежуточном участке (от г. Кинешмы до г. Ульяновска) щелочность была меньше, а цветность выше по сравнению с июнем 1966 г. (см. рисунок, 5). Очевидно, в июле 1969 г. в водной массе данного участка Волги еще было значительно участие вод весеннего паводка.

Валовое содержание органического углерода, определенное двумя методами, различалось не более чем на $\pm 3\%$. Необходимо отметить, что фотохимический и персульфатный методы определения валового углерода оказались вполне применимы в экспедиционных условиях. Сопоставление полученных данных с результатами параллельно проведенных определений органического углерода в сухих остатках показывает, что в июле 1969 г. в воде Волги и ее водохранилищ его содержание в среднем составляло 94% (80—101%) от валового органического углерода. Самые малые величины в сухом остатке (80—90% по отношению к валовому углероду) характерны для р. Керженец, где происходил сплав леса, и для участка ниже городов Волжска и Казани. Найденные в этой экспедиции величины отклонения количества углерода в сухом остатке от его валового содержания соответствуют тем результатам, которые были получены для различных вод (Ско-

Содержание некоторых компонентов солевого состава и отдельные показатели органического вещества в натуральной воде р. Волги, ее притоков и водохранилищ в июле 1969 г. от Рыбинского водохранилища до Астраханского заповедника

Номер станции	Пункт	Рас- сто- яние, км	Дата	рН	Щелоч- ность, мг-экв./ л	Цвет- ность, град.	Органический углерод, мг/л					Углерод су- хого остатка 1969 г. · 100	
							валовой по методу			сухого остатка			
							фотохими- ческому	персуль- фатному	сред- нее	мг/л	% от ва- лового		
Рыбинское водохранилище													
1/2	Сел. Шумерово	3 VII	7.4	1.38	47	10.2	10.4	10.3	10.0	97	83	
Горьковское водохранилище													
2/3	На 6 км ниже г. Рыбиска	...	4 VII	8.0	1.55	42	11.2	10.9	11.0	10.3	94	107	
3/4	На 3 км ниже г. Ярославля	...	4 VII	8.0	1.52	41	10.6	10.2	10.4	9.8	94	107	
4/4a	На 18 км выше г. Костромы	...	5 VII	7.9	1.57	37	9.9	10.4	10.2	9.3	91	90	
5/5	Ниже г. Кинешмы на 3 км	...	6 VII	7.9	1.73	38	11.6	10.8	11.2	10.6	95	126	
6/5a	Г. Юрьевец, напротив	...	6 VII	8.0	1.10	65	10.6	11.0	10.8	10.0	93	105	
7/56	Выше г. Пучежа на 2 км	...	6 VII	7.8	0.95	63	10.4	10.0	10.2	9.9	97	98	
р. Волга													
8/8	Ниже г. Балахны на 3 км	...	8 VII	7.9	0.70	62	12.1	11.4	11.8	11.7	99	90	
9/9	Р. Ока, выше устья на 10 км	...	11 VII	8.2	2.85	47	10.3	10.7	10.5	10.3	98	97	
10/10	Ниже г. Кстова на 2 км	...	11 VII	8.0	1.65	63	11.6	12.2	11.9	11.6	97	91	
11/10a	Р. Керженец, выше устья на 10 км	...	12 VII	7.3	0.90	170	26.2	27.0	26.6	21.2	80	—	
12/11	Р. Сура, выше устья на 4 км	...	12 VII	8.2	3.25	27	11.7	11.6	11.6	11.5	99	140	

Таблица 3 (продолжение)

Номер станции	Пункт	Расстояние, км	Дата	рН	Щелочность, мг-экв./л	Цветность, град.	Органический углерод, мг/л				Углерод сухого остатка 1969 г. 100	
							валовой по методу		сухого остатка		% от валового	Углерод сухого остатка 1966 г.
							фотохимическому	персульфатному	среднее	мг/л		
Куйбышевское водохранилище												
13	Ниже г. Чебоксар на 5 км	1469	13 VII	8.1	1.80	53	13.2	13.0	13.1	12.8	98	—
14/13	Ниже г. Волжска на 3 км	1562	14 VII	8.1	1.57	62	15.7	14.9	15.3	12.5	82	413
15/16	Ниже г. Казани на 5 км	1604	15 VII	8.1	1.43	58	15.2	14.8	15.0	12.9	86	107
16	Р. Кама, выше устья на 15 км	1674	16 VII	7.9	1.23	45	6.8	7.2	7.0	—	—	—
17	Сел. Ундоры, напротив	1781	16 VII	7.7	1.23	45	12.2	12.4	12.3	11.2	91	—
18/21	Ниже г. Ульяновска на 3 км	1809	18 VII	8.1	1.48	35	—	—	—	9.9	—	98
19/22	Черемшанский залив	1876	18 VII	8.3	1.57	38	9.9	—	9.9	9.3	94	111
20/23	Выше Куйбышевской плотины на 7 км	1947	18 VII	8.6	1.52	35	9.7	10.3	10.0	9.1	91	—
Саратовское водохранилище												
21	Ниже г. Куйбышева на 3 км	2022	20 VII	8.0	1.48	38	9.9	11.0	10.5	9.9	95	—
22	Выше г. Хвалынского на 5 км	2229	21 VII	8.0	1.48	37	10.9	10.9	10.9	10.3	95	—
23	Выше г. Саратова на 4 км	2453	23 VII	8.0	1.48	35	10.2	10.4	10.3	9.6	93	—
Волгоградское водохранилище												
24	Ниже г. Саратова на 3 км	2460	24 VII	8.0	1.55	35	10.8	11.0	10.9	10.0	92	—
25	Р. Еруслан, выше устья на 5 км	2624	25 VII	8.4	1.73	30	8.6	8.6	8.6	8.6	100	—
26	Ниже г. Камышина на 4 км	2668	25 VII	8.2	1.63	35	8.0	7.4	7.8	7.9	101	—
27	Выше г. Волгограда на 5 км	2834	26 VII	8.2	1.57	30	8.2	8.8	8.5	7.9	93	—
р. Волга												
28	Ниже г. Волгограда на 3 км	2842	28 VII	8.0	1.55	32	8.5	—	8.5	7.8	92	—
29	Сел. Енотаевка, напротив	3176	29 VII	8.4	1.73	30	—	—	—	8.0	—	—
30	Выше г. Астрахани на 5 км	3319	30 VII	8.2	1.70	25	7.2	7.2	7.2	7.1	99	—
31	Ниже г. Астрахани на 7 км	3331	31 VII	8.3	1.70	25	—	—	—	7.0	—	—
32	Сел. Оля, напротив	3404	31 VII	8.4	1.70	25	—	7.5	7.5	7.4	99	—
33	Астраханский заповедник	3474	3 VIII	8.0	1.73	30	—	—	—	7.7	—	—

Примечание. В тех случаях, когда местоположение станций в 1969 г. совпадало со станциями 1966 г., нумерация последних приведена в значающей.

пинцев и Бакулина, 1971); в водах открытых водоемов с невысокой биологической продуктивностью эти отклонения колебались от 0 до 18%. Таким образом ранее полученные данные по содержанию органического углерода в сухом остатке вод Волги и ее притоков в среднем немного отличаются от его валового содержания. Об изменении содержания органического углерода в сухом остатке вод Волги и ее водохранилищ в июле 1969 г. по сравнению с июнем 1966 г. можно судить по соответствующим кривым распределения на рисунке.

В 1969 г. содержание углерода в среднем составляло 102% от его количества в 1966 г., с отклонением от -10 до $+26\%$. Учитывая приведенную оценку цветности в эти годы и сопоставление перманганатной окисляемости в июне 1966 г. с соответствующими данными 1954—1955 г., можно считать, что содержание органического вещества в воде Волги и ее водохранилищ за указанные 15 лет существенно не изменилось.

Как следует из табл. 3, содержание валового органического углерода в воде вниз по Волге также уменьшается, что ранее было показано А. А. Зениным (1965) для перманганатной окисляемости.

В июне 1954 г. уменьшение перманганатной окисляемости в воде от г. Костромы до г. Куйбышева составляло 1.2 мг О/л и от г. Куйбышева до г. Астрахани — 2.2 мг О/л (в сумме 3.4 мг О/л). Уменьшение содержания валового органического углерода в воде в июле 1969 г. от г. Костромы до г. Астрахани составляло 3.0 мг С/л, или около 30% по отношению к начальному пункту. Цветность за это время соответственно уменьшилась от 37 до 25°, или на 33%.

Это явление обусловлено, по-видимому, не только разбавлением волжских вод в нижнем течении реки притоками и грунтовыми водами с малым содержанием органических веществ и частичной минерализацией органического вещества (Зенин, 1965), но и некоторым выцветанием окрашенных гумусовых соединений, а также их агрегацией с последующим выпадением в осадок, особенно в условиях зарегулированного стока (Скопинцев и Крылова, 1955).

Биохимическое потребление кислорода (БПК) в водах Волги и ее водохранилищ

Как известно, определение БПК за 5 суток (БПК_5) дает представление о содержании в воде, не имеющей кислой или щелочной реакции и не содержащей токсических продуктов, биохимически нестойких органических соединений. Для устранения влияния последних определения БПК проводят при нескольких разведениях.

В табл. 4 приведены результаты определения БПК_5 при температуре $20 \pm 2^\circ$, а также данные по растворенному кислороду.

За время работы по всей трассе маршрута степень насыщения воды кислородом в поверхностном слое воды Волги и ее водохранилищ колебалась от 74 до 96% и в среднем составляла 84%. По А. А. Зенину (1965), в весенне-летний период 1954—1955 гг. насыщение воды Волги кислородом колебалось от 80 до 100% и в среднем составляло 80—90%. Таким образом, содержание растворенного кислорода в воде Волги в июле 1969 г. практически совпадало с величинами 1954—1955 гг. В таких притоках, как Кама и Ока, степень насыщения воды кислородом в июле 1969 г. отличалась от крайних значений, наблюдавшихся в воде Волги и ее водохранилищ.

Величины БПК_5 в воде Волги, ее водохранилищ и притоков (табл. 4; рисунок) колебались от 0.7 до 2.3 мг О/л. Среднее БПК_5 в воде Волги и ее водохранилищ составляло 1.3 мг О/л. Более высокие значения характерны для Верхней и Средней Волги. Весьма показательны величины отношений

Растворенный кислород (О мг/л) и биохимическое потребление кислорода за 5 суток (БПК₅) в воде Волги и ее водохранилищ и некоторых притоков в июле 1969 г.

Номер стан- ции	Пункт	Дата	Темпе- рату- ра, °С	Кислород ра- створенный		БПК ₅ , мг О/л	БПК ₅ , Углерод валовой
				мг/л	сте- пень насы- щения		
Рыбинское водохранилище							
1	Сел. Шумерово	3 VII	15.8	8.78	86	1.2	0.12
Горьковское водохранилище							
4	Выше г. Костромы на 18 км . .	4 VII	16.0	8.22	81	1.5	0.15
5	Ниже г. Кинешмы на 3 км . .	4 VII	16.4	7.46	74	1.4	0.12
6	Г. Юрвец, напротив	4 VII	16.4	8.14	81	1.5	0.13
7	Выше г. Пучежа на 2 км . . .	4 VII	17.0	8.30	85	1.3	0.12
р. Волга							
8	Ниже г. Балахны на 3 км . .	8 VII	17.4	8.40	85	1.9	0.16
9	Р. Ока, выше устья на 10 км	11 VII	23.0	10.8	122	1.3	0.12
11	Р. Керзевец, выше устья на 10 км	12 VII	21.8	7.13	79	—	—
Куйбышевское водохранилище							
13	Ниже г. Чебоксар на 5 км . .	13 VII	22.2	7.65	85	2.3	0.17
14	Ниже г. Волжска на 3 км . .	14 VII	21.1	7.65	83	1.7	0.11
15	Ниже г. Казани на 5 км . . .	15 VII	21.8	7.50	83	1.3	0.08
16	Р. Кама, выше устья на 15 км	16 VII	19.8	6.06	64	0.97	0.14
18	Ниже г. Ульяновска на 3 км	18 VII	18.7	7.56	79	1.3	—
19	Черемшанский залив	18 VII	17.6	8.19	84	0.9	0.09
Саратовское водохранилище							
21	Ниже г. Куйбышева на 3 км	18 VII	18.5	7.80	81	1.4	0.13
22	Выше г. Хвалынска на 10 км	21 VII	18.6	7.80	81	0.7	0.07
23	Выше г. Саратова на 4 км . .	23 VII	19.3	7.74	82	0.9	0.09
Волгоградское водохранилище							
24	Ниже г. Саратова на 3 км . .	24 VII	19.8	7.80	83	0.78	0.07
25	Р. Еруслан, выше устья на 5 км	25 VII	20.3	8.31	89	0.9	0.10
26	Ниже г. Камышина на 4 км	25 VII	20.4	8.46	91	—	—
р. Волга							
28	Ниже г. Волгограда на 3 км	28 VII	20.8	6.95	75	0.9	0.11
29	Сел. Енотаевка, напротив . . .	29 VII	20.9	8.10	88	1.5	—
30	Выше г. Астрахани на 5 км . .	30 VII	22.0	8.70	96	1.4	0.21
31	Ниже г. Астрахани на 7 км . .	31 VII	22.0	8.61	95	0.8	—

Таблица 5

Содержание некоторых компонентов солевого состава и отдельные показатели органического вещества в сточных водах ряда городов и производственных предприятий после очистных установок (июнь 1966 г.)

Пункт	Дата	мг-экв./л			Кальций	Цветность, град.	Углерод органиче-ский, мг/л	Окисле-мость, мг О/л		Цветность Углерод органиче-ский	Окисляемость Углерод перманганатная	Окисляемость биохимический	Окисляемость перманганатная	Окисляемость биохимическая	БПК ₅ *, мг О/л	БПК ₅ Углерод сухого остатка
		Щелоч-ность	Жест-кость общая	Кальций												
Вниз от Рыбинского водохранилища																
Горьковское водохранилище																
Рыбинск, город-ской коллектор	6 VI	3.25	2.88	1.98	Цвет серый	56.0	50.1	310.3	—	0.9	5.5	16.1	64.8 и 96.5	1.2 и 1.7		
Р. Печегда, нефте-перерабатываю-щий завод . . .	6 VI	2.38	3.74	2.58	410	32.6	34.6	132.0	3.4	1.1	4.1	26.2	34.6 и 36.0	1.1 и 1.1		
Г. Ярославль, го-родской коллек-тор	7 VI	3.29	3.23	2.26	80	120.2	67.3	315.3	0.6	0.6	2.6	21.4	125.0 и 156.0	1.0 и 1.3		
Г. Ярославль, нефтеперераба-тывающий завод	7 VI	2.34	20.48	15.22	50	103.2	63.2	331.7	0.5	0.6	3.2	19.1	29.0 и 32.2	2.8 и 3.1		
р. Волга																
Г. Балахна, бу-мажный комбл-нат	8 VI	2.75	2.38	1.84	20	43.2	28.5	190.5	0.5	0.7	6.7	15.0	71.0 и 95.0	1.6 и 2.1		
Г. Горький, го-родской коллек-тор	9 VI	3.33	4.54	2.88	25	104.4	84.8	466.4	0.2	0.8	4.5	18.2	343.0 и 391.0	3.3 и 3.7		
Г. Кстово, нефте-перерабатываю-щий завод . .	9 VI	2.27	37.4	28.69	60	39.9	30.6	459.8	1.5	0.8	11.5	7.9	28.0 и 20.0	0.7 и 0.5		
Куйбышевское водохранилище																
Г. Волжск, отстой-ные пруды бу-мажного комби-ната	11 VI	1.91	2.40	1.89	90	21.1	25.3	78.8	4.3	1.2	3.7	32.0	18.0 и 23.0	0.8 и 1.1		

Г. Ульяновск, городской коллектор	13 VI	6.29	5.44	4.15	—	36.9	64.1	364.5	—	1.7	9.9	17.5	247.5 и 269.0	6.7 и 7.4
Г. Куйбышев, городской коллектор	15 VI	2.07	9.80	7.38	—	165.0	8.99	279.2	—	0.05	1.7	3.2	87.0 и 128.0	0.5 и 0.8
Г. Куйбышев, нефтеперерабатывающий завод	14 VI	2.22	17.18	13.14	—	84.0	100.9	101.8	—	1.2	1.2	97.6	—	—

Вверх от г. Куйбышева
Горьковское водохранилище

Г. Рыбинск, городской коллектор	24 VI	1.80	2.79	1.96	—	43.2	58.9	—	—	1.4	—	—	—	—
Р. Печегда, нефтеперерабатывающий завод	24 VI	1.97	3.78	2.33	—	51.3	56.5	—	—	1.1	—	—	—	—
Г. Ярославль, нефтеперерабатывающий завод	23 VI	1.67	10.15	7.15	—	69.0	41.6	—	—	0.6	—	—	—	—

р. Волга

Г. Балахна, буковый комбинат	21 VI	2.79	2.70	2.08	40	—	12.7	—	—	—	—	—	—	—
Г. Горький, городской коллектор	20 VI	3.43	4.80	3.18	—	—	77.5	—	—	—	—	—	343.0 и 356.0	—

Куйбышевское водохранилище

Г. Волжск, отстойные пруды букового комбината	18 VI	2.95	3.14	2.54	—	36.2	64.3	—	—	1.8	—	—	—	—
Г. Казань, городской коллектор	17 VI	6.06	11.71	8.30	—	63.1	92.4	—	—	1.4	—	—	370.0 и 352.0	5.9 и 5.6
Г. Тольятти, объединенный сток	15 VI	2.11	—	—	—	24.0	8.19	—	—	0.4	—	—	21.5 и 24.0	0.9 и 1.0

* Результаты определения БПК₅ получены при двух разведениях.

БПК₅ к органическому углероду (табл. 4). Как было показано ранее (Скопинцев, 1950б), малые величины этого отношения (< 0.5) характерны для вод с малым содержанием нестойкого органического вещества. При возрастающем количестве последнего величина данного отношения увеличивается (> 0.5), что подтверждается также соответствующими данными по сточным водам (табл. 5). В июле 1969 г. величина этого отношения для вод Волги и ее водохранилищ колебалась от 0.07 до 0.21.

Для сравнения приведем соответствующие значения, полученные летом 1940—1941 гг. в незагрязненных участках 8 рек Московской и сопредельных областей (Скопинцев, 1950а): величины БПК₅ колебались от 0.4 до 2.2 и в среднем составляли 1.2 мг О/л, а величины отношений БПК₅ к перманганатной окисляемости колебались от 0.03 до 0.3. Таким образом, значение БПК₅ и вычисленные отношения для воды Волги и ее водохранилищ по трассе судового фарватера в 1969 г. почти не отличаются от результатов более ранних исследований на указанных реках.

В то же время в период наблюдений 1966 и 1969 гг. вблизи ряда больших городов на Волге можно было визуально обнаружить нефтяные загрязнения и другие посторонние примеси. Их происхождение, несомненно, связано со спуском сточных вод, сбрасываемых как из городских, так и производственных коллекторов. Результаты химического анализа проб сточных вод, отобранных из ряда коллекторов в 1966 г., представлены в табл. 5.

Рассмотрение данных по сточным водам начнем с БПК₅. Результаты определения, выполненные при двух разведениях, отличались от среднего для всех исследованных вод на 2—20% (в среднем на 9%). Такое отклонение вполне допустимо.

Абсолютные значения средних величин БПК₅ в исследованных стоках были равны 20—367 мг О/л, из них в стоках городских коллекторов БПК₅ составляло 81—367 мг О/л. В стоках нефтеперегонных заводов и двух бумажных комбинатов величины БПК₅ колебались от 20 до 83 мг О/л.

Абсолютные значения БПК₅ в водах исследованных стоков, как и данные по перманганатной и бихроматной окисляемости и органическому углероду в сухом остатке от упаривания, во много раз превышают соответствующие данные, полученные в воде Волги и ее водохранилищ на трассе судового фарватера. Среднее содержание углерода в сточных водах отражено на рисунке, где соответствующее положение пунктов отбора проб показано одинарными кружками с цифрой, отвечающей порядковому номеру, указанному в табл. 5.

Для исследованных сточных вод весьма показательно также отличие величин отношений БПК₅, цветности, перманганатной и бихроматной окисляемости к органическому углероду и перманганатной окисляемости к бихроматной от соответствующих значений, вычисленных для вод Волги и ее водохранилищ. Это подтверждает большое различие природы органического вещества указанных вод. В отличие от речных вод в ряде сточных вод (некоторые городские коллекторы и Балахнинский бумажный комбинат) щелочность больше общей жесткости, что свидетельствует о значительном содержании в воде одновалентных катионов. Для стоков ряда нефтеперегонных заводов и некоторых городских стоков характерно преобладание общей жесткости над щелочностью, что указывает на обогащение их анионами сильных кислот.

Вполне очевидно, что влияние сточных вод городских и промышленных коллекторов на Волгу и ее водохранилища проявляется в значительно большей степени в прибрежных участках. По трассе судового фарватера в этом плане имеет определенное значение водный транспорт.

Проведенные исследования дают основание полагать, что для установления размеров загрязнения помимо определения общих показателей ор-

ганического вещества необходимо располагать данными по содержанию соответствующих специфических органических соединений производственного происхождения (особенно синтетического производства), нефтепродуктов и т. д. Конечно, следует определять и содержание ряда тяжелых металлов. Особенно большое внимание нужно уделять бактериологическим исследованиям. Весь комплекс указанных исследований необходимо проводить на всем поперечном сечении реки.

ВЫВОДЫ

1. Перманганатная окисляемость вод Волги и ее водохранилищ, определенная в июне 1966 г. по трассе судового фарватера на участке от Рыбинского водохранилища от г. Куйбышева, мало отличается от результатов, полученных в весенне-летний сезон 1954—1955 гг.

2. Содержание органического углерода в сухих остатках выпаренных вод в июне 1966 г. близко к значениям кислорода перманганатной окисляемости.

3. Содержание валового органического углерода, определенное впервые в экспедиционных условиях в июле 1969 г. в пробах воды на участке от Рыбинского водохранилища до г. Астрахани, изменялось от 10.3 до 7.2 мг С/л. Данные по содержанию углерода в сухом остатке в тех же пробах воды меньше в среднем на 6% при крайних отклонениях от —20% до +1%. Относительное изменение цветности воды на том же протяжении реки того же порядка.

4. Биохимическое потребление кислорода за 5 суток на исследованном участке колебалось от 0.72 до 2.3 мг О/л и в среднем составляло 1.3 мг О/л.

5. Общее содержание органического вещества на всем протяжении р. Волги по всем рассмотренным показателям за время с 1954 до 1969 г. изменилось мало.

6. Дана общая характеристика сточных вод, отобранных из ряда городских и промышленных коллекторов.

ЛИТЕРАТУРА

- Б и к б у л а т о в а Е. М., Б. А. Скопинцев и Э. С. Бикбулатов. 1969. Персульфатный и фотохимический методы определения валового органического углерода в пресных водах. Матер. к совещ. по прогнозированию содержания биогенных элементов и органического вещества в водохранилищах. Рыбинск.
- Д р а ч е в С. М., А. С. Разумов, Б. А. Скопинцев и И. М. Кабанов. 1960. Приемы санитарного изучения водоемов. М.
- З е н и н А. А. 1965. Гидрохимия Волги и ее водохранилищ. Л.
- К р ы л о в а Л. П. 1956. Определение углерода органического вещества природных вод методом сухого сжигания. Гидрохим. матер., т. 26.
- Н и к о л а е в а Е. А. 1953. О бихроматном методе определения окисляемости в пресных водах. Гидрохим. матер., т. 20.
- О с н о в н ы е гидрологические характеристики. 1966, 1967. Т. 10 и 12.
- С к о п и н ц е в Б. А. 1950а. Изменение некоторых химических и физических свойств природных вод при длительном хранении. Гидрохим. матер., т. 17.
- С к о п и н ц е в Б. А. 1950б. Органическое вещество в природных водах (водный гумус). Тр. Гос. океаногр. инст., № 17 (29).
- С к о п и н ц е в Б. А., А. Г. Бакулина. 1971. Оценка размеров потерь органического вещества при выпаривании природных вод. Гидробиол. журн., т. 7, № 6.
- С к о п и н ц е в Б. А. и Л. П. Крылова. 1955. Результаты изучения некоторых вопросов динамики органического вещества в природных водах. Тр. Всесоюз. гидробиол. общ., т. VI.

**ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО В ВОДЕ
ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА И НЕКОТОРЫХ ВОДОЕМОВ
ВОЛГО-БАЛТИЙСКОГО ВОДНОГО ПУТИ
ЛЕТОМ 1968 г.**

В июле—августе 1968 г. во время гидрологических работ на Онежском озере в выходной части зал. Большое Онего и в открытой части озера были проведены химические исследования, направленные в основном на изучение содержания в воде озера органического вещества и определение биохимического потребления кислорода (БПК) в разные сроки. Соответствующих данных по открытой части Онежского озера практически нет. Как отмечает Г. Ф. Расплетина (1965), большая часть гидрохимических исследований в прежние годы проводилась в отдельных его заливах. Попутно аналогичные определения выполнялись в Рыбинском и Шекснинском водохранилищах, включая Белое озеро, а также в Сиверском озере. Пробы воды отбирались с глубины 0.5—1.0 м от поверхности, а на Онежском озере и над дном. На судне определялись цветность после фильтрации через бумажный фильтр и в натуральной воде, рН, щелочность, общая жесткость и кальций, растворенный кислород, перманганатная окисляемость и БПК. Последнее определение при длительных сроках инкубации заканчивалось в лаборатории Института. Там же проводилось определение бихроматной окисляемости и органического углерода в сухих остатках проб воды, выпаренных на судне. В ряде проб после их длительного хранения в холодильнике было сделано еще одно определение БПК. Анализы выполнялись по тем же методам, какие применялись во время работы на Волге (Скопинцев и др., 1972). Полученные результаты приведены в табл. 1 и 2.

Как следует из табл. 1, щелочность и общая жесткость, а также содержание кальция в исследованных пробах воды Онежского озера немного больше соответствующих значений, найденных в выходной части Большого Повенецкого залива (Толмачев, 1930) и в районе зал. Большое Онего, примыкающем к открытой части озера (Молчанов, 1946). Такое распределение этих показателей характерно именно для водной массы центральной части озера, цветность которой составляет 20—30°, т. е. меньше, нежели в воде прибрежных районов (Богословский, Кириллова, 1969).

Содержание кислорода (в процентах от полного насыщения), наименьшее на самой глубоководной станции, близко к тому количеству, которое было найдено в июле 1928 г. на глубоководной станции разреза в выходной части Большой Губы (Толмачев, 1930). На следующих станциях, расположенных южнее, степень насыщения воды кислородом в 1968 г. несколько

Содержание некоторых компонентов солевого состава и отдельные показатели органического вещества в натуральной воде Онежского озера в июле 1968 г.

Глубина взяти проб, м	Дата	Температура воды, °С	рН	Ще- лоч- ность	Жест- кость	Каль- ций	Кислород		Цветность, град.	Углерод органи- ческий, мг/л	Окисляе- мость, мг О/л		Перманганатная окисляемость	Углерод	Перманганатная окисляемость	Бихроматная окисляемость	Бихроматная окисляемость	Углерод
				мг-экв./л			мг/л	степень насыще- ний, %			перманга- натная	бихромат- ная						
Разрез 1, ст. 31 (от Луды Павша до о. Малого Климецкого)																		
0.5	22 VII	11.0	6.99	0.32	0.39	0.25	10.4	92	25	6.0	6.6	13.9	1.1		47		2.3	
52.0	22 VII	4.0	6.95	0.32	0.39	0.26	10.2	77	24	6.6	5.9	15.4	0.9		38		2.3	
Разрез 2, ст. 23 (от м. Шокшинского до о. Сосновец)																		
1.0	23 VII	10.3	7.05	0.32	0.39	0.25	10.8	95	25	5.8	6.2	14.3	1.1		43		2.4	
50.0	23 VII	4.5	6.99	0.32	0.39	0.25	12.2	93	25	5.8	6.2	14.2	1.1		44		2.4	
Разрез 4, ст. 10 (от сел. Каскес-ручей к устью р. Андома)																		
1.0	28 VII	12.9	7.05	0.32	0.39	0.23	10.4	97	23	5.9	6.6	15.2	1.1		43		2.6	
26.0	28 VII	10.3	6.99	0.32	0.39	0.23	10.4	91	23	5.7	6.4	14.6	1.1		44		2.6	

увеличилась, но не достигла тех величин, которые были получены в Повеенском заливе летом 1966 г., когда температура поверхностной воды была выше (Форш-Меншуткина, 1969). Значения pH летом 1968 г. тоже были несколько ниже.

Полученные нами данные по перманганатной окисляемости примерно на 10% выше результатов ее определения в 1928 г. на указанной станции разреза в выходной части Большой Губы.

Впервые проведенные на Онежском озере определения органического углерода показывают, что его содержание составляет около 6.0 мг/л, а отношение перманганатной окисляемости к углероду несколько больше 1.0. Эта величина, как и высокое отношение окисляемости перманганатной к бихроматной (> 40%), дает основание считать, что в исследованных водах содержание нестойких органических веществ невелико и в них преобладает водный гумус терригенного происхождения (Скопинцев, 1950б). Величина отношения кислорода бихроматной окисляемости к органическому углероду меньше отношения углерода к глюкозе (ее кислородный эквивалент 2.66), что характерно для речных вод весенне-паводочного периода (Николаева, Скопинцев, 1961).

Приведенная характеристика свойственна водоемам с невысокой биологической продуктивностью, к которым относится и Онежское озеро (Романенко, 1966; Сорокин и Федоров, 1969). Содержание органического вещества и величины отношений отдельных его показателей в водах других водоемов Волго-Балтийского пути (табл. 2) близки к результатам соответствующих определений, выполненных в те же месяцы прошлых лет (Скопинцев, Бакулина, 1966а, 1966б). Для вод Белого озера характерно более значительное участие органического вещества планктоногенного происхождения.

Данные табл. 3 отражают изменения в содержании органического углерода за длительный срок хранения проб воды в холодильнике. За первые 9 месяцев уменьшение органического углерода составило 9—12% и за последующие 11 месяцев — 5—18% по отношению к исходному содержа-

Содержание некоторых компонентов солевого состава и отдельные показатели органического вещества в натуральной воде водоемов Волго-Балтийского водного пути в июле 1968 г.

Пункт отбора проб	Дата	Температура воды, °С	pH	мг-экв./л			Кислород		Цветность, град.	Углерод органический, мг/л	Окисляемость, мг О/л		Лерманганатная окисляемость	Лерманганатная окисляемость · 100	Вихроматная окисляемость
				Щелочность	Жесткость	Кальций	мг/л	степень насыщен, %			перманганатная	бихроматная			
Рыбинское водохранилище															
Сел. Городок . . .	15 VII	16.8	7.45	1.33	1.77	1.23	7.62	77	50	10.4	41.8	29.2	1.1	40	2.8
Сел. Ольхово . .	15 VII	16.3	7.40	1.08	1.49	1.02	7.69	76	55	12.9	43.2	29.2	1.0	45	2.3
Шексинское водохранилище															
Дер. Черная															
Гряды . . .	15 VII	18.1	7.19	1.16	1.50	1.04	6.41	66	55	11.4	41.8	27.7	1.0	43	2.4
Дер. Горицы . .	15 VII	15.9	7.40	1.16	1.52	1.09	8.22	81	53	12.3	41.5	29.6	0.94	39	2.4
Белое озеро															
Буй № 7	16 VII	15.8	7.45	1.00	1.22	0.86	8.18	80	45	10.7	10.7	27.7	1.0	39	2.6
Буй № 5	16 VII	16.1	7.61	1.04	1.27	0.88	8.50	84	45	10.6	10.1	27.7	0.95	37	2.6
Сиверское озеро															
На глубине 1.0 м	31 VII	15.2	7.75	—	—	—	—	—	—	6.9	—	18.6	—	—	—

Изменение содержания органического углерода в сухих остатках
от упаривания воды за время хранения ее в темноте при температуре 5°

Водоем	Пункт отбора проб	Органический углерод				
		июль 1968 г.	апрель 1969 г.		март 1970 г.	
		мг/л	мг/л	‰ *	мг/л	‰ *
Рыбинское водохрани- лище	Сел. Городок	10.4	10.9	105	—	—
	Сел. Ольхово	12.9	11.7	91	—	—
Шекснинское водохра- нилище	Дер. Черная Гряда . .	11.4	10.3	90	8.9	78
	Дер. Горицы	12.3	—	—	8.5	69
Белое озеро	Буй № 7	10.7	9.4	88	8.9	83
	Буй № 5	10.6	9.0	89	7.5	71

* По отношению к июлю 1968 г.

нию. Ниже эти данные будут сопоставлены с результатами определения БПК за длительные сроки инкубации.

БПК во всех исследованных водоемах учитывалось за 5 суток инкубации воды (БПК₅), для вычисления величин констант скорости потребления кислорода, — за 2, 4 и 8 суток (табл. 4). Температура воды за время инкубации колебалась от 15 до 20° и в среднем была равна 18°. Для контроля в Онежском озере на ст. 10 были отобраны пробы воды (5б и 6б) через 4 часа после взятия первых проб (5а и 6а). Повторные пробы были взяты на обратном пути также в Рыбинском и Шекснинском водохранилищах и Белом озере 31 июля и 1 августа (1б и 2б), т. е. спустя 2 недели после взятия первых проб в этих водоемах (1а и 2а). Они были использованы для определения БПК за длительные сроки инкубации. В ряде случаев определение БПК проводилось в двух параллельных склянках. Полученные величины помещены попарно в соответствующих графах табл. 4. В этой таблице помимо опытных данных приведены также результаты некоторых расчетов.

Определение БПК, предложенное более 50 лет назад для контроля за очисткой бытовых сточных вод, в дальнейшем применялось и для оценки интенсивности загрязнения природных вод сбрасываемыми в водоемы сточными водами. Было найдено, что в разбавленных бытовых сточных водах (не содержащих токсических веществ и имеющих рН в пределах около 6—8) при наличии растворенного кислорода и при температуре 20° потребление кислорода практически заканчивается за 20 суток. Расход кислорода за это время назван полным биохимическим потреблением кислорода (БПК₂₀). За 5 суток (БПК₅) потребление кислорода составляет 70—80% от полного БПК. Скорость потребления кислорода за время инкубации подчиняется закону мономолекулярных реакций, т. е. идет по экспоненте. Константа скорости данного процесса в разбавленных сточных водах составляет 0.10—0.15. По истечении этой первой стадии окисления наступает вторая — нитрификация.

Ввиду того что непосредственное определение полного БПК требует много времени, его можно рассчитать либо по БПК₅, либо применяя следующую формулу (Лапшин, 1952):

$$\text{Полное БПК} = \frac{Dt^2}{2D_t - D_{2t}}, \quad (1)$$

где t — время инкубации, сутки; D_t и D_{2t} — потребление кислорода, мг/л за время t и $2t$. Обычно определение проводят за 2—4, 3—6 и 4—8 суток.

Результаты определения БПК в воде Онежского озера и других водоемов Волго-Балтийского водного пути

Водоем и номер пробы	Время инкубации, сутки												Константа скорости БПК	БПК _∞ , мг О/л	БПК ₅ Органический С	Общее БПК, мг О/л								
	БПК в мг О/л (А) и в % от общего БПК (Б)																							
	2				8				20								60				120			
	А	А	А	А	Б	А	А	А	Б	А	А	А					Б	А	А	Б	А	А	Б	
Онежское озеро	1	0.12	0.25	0.31	2	0.37	—	—	—	—	—	—	3.03	17	?	0.08	?	?	0.5	0.05	18.0			
	2	0.06	0.90	0.72	4	1.53	—	—	—	—	—	—	2.76	16	?	0.04	?	3.0	0.11	19.8				
	3	0.16	0.22	0.47	3	0.87	—	—	—	—	—	—	2.26	14	0.21	?	0.25	?	0.08	17.4				
	4	0.28	0.78	1.09	6	1.06	—	—	—	—	—	—	2.85	17	?	0.11	?	1.2	0.19	17.4				
	5а	0.31	0.53	0.78	4	1.02	1.38	8	2.41	13	—	—	2.92	—	0.10	0.01	1.1	7.0	0.13	17.7				
Рыбинское водохранилище	5б	0.29	—	0.39	2	1.24	—	—	2.25	13	15	—	2.63	15	—	?	—	?	0.06	17.7				
	6а	0.12	0.29	0.40	2	0.90	1.40	8	2.28	13	16	—	2.78	16	?	?	?	?	0.07	17.1				
	6б	0.15	—	0.28	2	1.02	—	—	2.32	13	18	—	3.09	18	—	?	—	?	0.05	17.1				
	1а	0.15	0.28	0.24	1	0.68	—	—	—	—	—	—	6.79	25	0.03	?	1.1	?	0.02	27.0				
	1б	—	—	0.84	3	—	2.41	9	4.55	17	25	—	5.60	21	—	—	—	—	—	27.0				
Шекснинское водохранилище	2а	0.38	0.63	0.75	2	1.06	—	—	5.42	20	21	—	5.60	21	0.09	0.04	1.1	2.0	0.06	33.6				
	2б	—	—	1.74	5	—	3.93	12	5.76	17	24	—	8.03	24	—	—	—	—	—	33.6				
	1а	0.35	0.75	0.68	2	1.21	—	—	6.29	19	24	—	8.06	24	?	0.05	?	1.9	0.06	29.6				
	1б	—	1.46	1.86	6	—	3.20	10	4.92	16	—	—	7.06	24	—	—	?	—	—	29.6				
	2а	0.94	1.50	1.62	2	2.31	—	—	—	—	—	—	8.06	24	0.11	0.07	2.3	3.3	0.13	32.0				
Белое озеро	2б	—	1.50	1.59	5	—	3.83	12	6.23	19	—	—	>8.92	28	0.24	?	0.3	?	0.04	27.8				
	1а	0.18	0.24	0.40	1.5	0.62	—	—	—	—	—	—	7.49	27	0.08	?	0.6	?	—	27.8				
	1б	—	1.01	1.12	4	—	3.35	12	4.97	18	—	—	7.49	27	0.08	?	—	?	0.05	27.4				
	2а	0.19	0.32	0.50	2	0.81	—	—	5.52	20	28	—	7.60	28	—	—	0.10	4.0	—	27.4				
	2б	—	1.03	1.56	6	—	3.27	12	4.24	21	27	—	5.45	27	0.04	—	—	—	—	20.3				
Сиверское озеро	1	0.68	1.25	1.45	5	1.74	2.55	12	4.24	21	27	—	5.18	26	0.04	0.10	4.0	1.8	0.15	20.3				
	1	—	—	1.09	—	—	2.49	12	3.90	19	—	—	5.18	26	—	—	—	—	—	—				

Примечание. 1. В первой графе индексами а и б обозначены пробы, взятые первый раз и повторно. 2. При расчете общего БПК-а повторных использованы данные по органическому углероду, определенному в первичных пробах. 3. Знак вопроса указывает на отрицательные величины.

Определение БПК в природных водах (в пресных и морских) показало, что кислород потребляется и в более длительные сроки инкубации (Скопинцев, 1949, 1950а; Новоселов, 1962; Скопинцев, 1962). Этими исследованиями было установлено, что кривые БПК, имеющие в первые 20—30 дней вид параболы, в дальнейшем становятся практически прямолинейными с малым углом подъема, что характерно для процессов, идущих с постоянной и малой скоростью. Это дало основание полагать, что окислению подвергаются и стойкие органические вещества, относящиеся у группе соединений водного гумуса (как терригенного, так и планктонного происхождения). Очевидно, их окисление имеет место и в те первые 20 суток, в которые, как было сказано выше, протекает полное БПК, обусловленное окислением нестойкого органического вещества. Естественно, что чем меньше относительное содержание в воде нестойкого и чем больше относительное содержание стойкого органического вещества, тем больше участие последнего в потреблении кислорода. Таким образом, в природных незагрязненных водах, где нестойкое органическое вещество связано с жизнедеятельностью организмов и наличием их смертных остатков, расчетные данные по полному БПК не дают истинного представления о содержании легкоусвояемой органики. Закономерность их окисления, отмеченная выше, как бы маскируется окислением водного гумуса. Это подтверждается результатами исследований, приведенными в табл. 4.

Согласно 11 параллельным определениям БПК в разные сроки инкубации отклонение от средней величины в 3 опытах составляло $\pm 10\%$, а в остальных колебалось от ± 1 до $\pm 8\%$, что можно считать весьма удовлетворительным. Повторное определение БПК (через 4 часа) в воде Онежского озера в разные сроки инкубации в преобладающем числе случаев различалось немного. Обращают на себя внимание более высокие величины БПК в глубинных водах ст. 31 и 23. В водах Рыбинского и Шекснинского водохранилищ и Белого озера БПК₅ в конце июля было значительно выше, чем в середине этого месяца. Значения констант скорости БПК (K), вычисленные для разных вод по формуле

$$K = \frac{1}{t} \lg \frac{D_t}{D_{2t} - D_t}, \quad (2)$$

в большинстве случаев были меньше 0.1 и лишь в 4 опытах колебались от 0.11 до 0.21. Интересно, что лишь в половине опытов удалось вычислить значения K по двукратным определениям. В тех же случаях, когда величины K получены по обоим парным срокам, чаще всего наблюдались значительные их расхождения.

То же следует сказать о значениях полного БПК, вычисленных по формуле (1). И при этих расчетах почти для половины данных получены отрицательные результаты. Очевидно, в первые дни инкубации потребление кислорода в исследованных водах было не столь закономерно, как при значительном содержании нестойкого органического вещества.

Весьма показательны также величины отношения БПК₅ к БПК₂₀: они вычислены для экспериментальных и расчетных значений БПК₂₀. В разных водах эти величины в первом случае колебались от 29 до 58% и в среднем составляли 44%, т. е. интенсивность потребления кислорода в исследованных водах была почти в 2 раза меньше, чем это принято для разбавленных сточных вод. Во втором случае значения рассматриваемого отношения колебались от 11 до 186%, что свидетельствует о малой надежности вычисленных величин полного БПК.

Для оценки содержания в воде нестойких органических соединений по БПК₅ более показательны отношения БПК₅ к органическому углероду. Проведенные нами расчеты показывают, что эта величина в исследованных водах колебалась от 0.02 до 0.19, т. е. она всюду значительно меньше 0.5.

Для сточных вод и загрязненных ими природных вод величина этого отношения близка или больше 0.5 (Скопинцев, 1950б). Таким образом, малые значения отношения БПК₅ к органическому углероду характерны для вод с преобладанием стойкого органического вещества.

Другим характерным критерием для оценки состояния органического вещества в природных водах является отношение величин БПК₅ за разные сроки инкубации к общему БПК, которое находим путем умножения количества органического углерода¹ на кислородный эквивалент. Кислородный эквивалент с учетом нитрификации (по углероду) для водоемов со значительным содержанием водного гумуса терригенного происхождения равен 2.6, для вод со значительным содержанием гумуса планктонного происхождения — 3.0 (Скопинцев, 1947). В данном исследовании к первой группе водоемов отнесены Рыбинское и Шекснинское водохранилища, Белое озеро, ко второй группе — Онежское и Сиверское озера. В ранее опубликованных работах (Скопинцев, 1949, 1950а, 1962) рассчитанные таким образом величины БПК были названы «вычисленное полное БПК». Как уже указывалось, в литературе по сточным водам под термином «полное БПК» подразумевается вычисленная величина БПК за 20 дней. Поэтому в этой работе принят термин «общее БПК», что является более правомерным, так как в этой величине учтен расход кислорода и на нитрификацию, которая, несомненно, имеет место при длительных сроках инкубации. Без учета нитрификации величина кислородного эквивалента соответственно равна 2.4 и 2.8.

Вычисленные значения общего БПК для рассматриваемых здесь вод приведены в табл. 4. Величины отношения БПК за разные сроки инкубации к общему БПК приведены в соответствующих графах под буквой Б. Отношение БПК₅ к общему БПК в исследованных водах колеблется от 1 до 6%. Наибольшие значения характерны для глубинных вод трех станций Онежского озера, для Сиверского озера и для повторных станций других водоемов. В следующие сроки определений (через 20, 60 и 120 суток) величины отношений возрастали, но с убывающей интенсивностью. По-прежнему меньшие значения были характерны для вод Онежского озера. В пределах каждого срока для этих вод, так же как для вод обоих водохранилищ и Сиверского озера, колебания указанного отношения были небольшие. За 120 дней инкубации в водах Онежского озера органическое вещество окислилось на 14—18%, а в остальных водоемах несколько больше — от 21 до 28%.

Если считать, что нестойкие органические соединения полностью окисляются за 20 суток, то их содержание в воде Онежского озера составляет около 8%, а в водах других водоемов — около 12% от всего содержания органического вещества. За последующие 100 суток окисляется соответственно около 8 и 14%. Последние величины дают представление о потенциальной возможности использования микроорганизмами водного гумуса. Следует иметь в виду, что опыты проводились при оптимальной температуре и при довольно большом отношении твердой поверхности к общему объему воды (объем склянок для определения БПК был около 150 мл). За 20 месяцев инкубации при температуре 5—7° (табл. 3) содержание органического углерода в исследованных водах уменьшилось на 17—30%, что близко к приведенным выше результатам по БПК₁₂₀ (отметим, что температура была в 3 раза ниже, а срок инкубации — в 5 раз больше).

В аналогичных опытах по определению БПК за длительные сроки инкубации, проведенных в 1940—1941 гг. на водах рек Московской и сопредельных областей (при температуре 15—20°), величины отношений

¹ Здесь использованы данные по углероду в сухом остатке. Согласно исследованиям А. Г. Бакулиной и Б. А. Скопинцева (1969), при упаривании воды из изученных водоемов потеря органического вещества в среднем составляет около 10%.

БПК₂₀ и БПК₁₂₀ к общему БПК чаще были выше. Исключение составляла р. Тверца. Очевидно, повышенное содержание нестойкого органического вещества в этих водах объясняется большей заселенностью берегов исследованных рек (Скопинцев, 1950а).

ВЫВОДЫ

1. Содержание органического углерода в сухих остатках в поверхностных и глубинных водах открытой части Онежского озера в июле 1968 г. колебалось от 5.7 до 5.9 мг/л. Отношение кислорода перманганатной окисляемости к органическому углероду было равно 1.1. За 120 суток окисляется 14—18% от общего содержания органического вещества, из них на долю его нестойкой, усвояемой части (определяемой по БПК₂₀) приходится около половины.

2. В водах Рыбинского и Шекснинского водохранилищ, Белого и Сиверского озер за 120 суток окисляется 23—28% от общего содержания органического вещества, из них на долю нестойкой, усвояемой части приходится несколько меньше половины.

ЛИТЕРАТУРА

- Бакулина А. Г. и Б. А. Скопинцев. 1969. Определение валового органического углерода в природных водах методом сухого сжигания. Гидрохим. матер., т. 52.
- Богословский Б. Б., В. А. Кириллова. 1969. Некоторые особенности водных масс Онежского и Ладожского озер. В кн.: Предварительные результаты работ комплексной экспедиции по исследованию Онежского озера, вып. 4. Петрозаводск.
- Лапшин М. И. 1952. Разработка способов очистки сточных вод. М.
- Молчанов И. В. 1946. Онежское озеро. Л.
- Николаева Е. Н., Б. А. Скопинцев. 1961. Бихроматная окисляемость в водах рек и озер Подмосковья и крупных рек Советского Союза. Гидрохим. матер., т. 31.
- Новоселов А. А. 1962. Изучение биохимического потребления кислорода в воде северной части Атлантики. Океанол., т. 2, № 1.
- Расплетина Г. Ф. 1965. Предварительная характеристика биогенного состава воды Онежского озера. В кн.: Предварительные результаты работ комплексной экспедиции по исследованию Онежского озера, вып. 1. Петрозаводск.
- Романенко В. И. 1966. Микробиологическое обследование Онежского озера и Сиверских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 13 (16).
- Скопинцев Б. А. 1947. О кислородном эквиваленте органических веществ природных вод. ДАН СССР, т. 58, № 9.
- Скопинцев Б. А. 1949. О потреблении кислорода в природных водах стойкими органическими веществами. Гидрохим. матер., т. 16.
- Скопинцев Б. А. 1950а. Изменение некоторых химических и физических свойств природных вод при длительном хранении. Гидрохим. матер., т. 17.
- Скопинцев Б. А. 1950б. Органическое вещество в природных водах (водный гумус). Тр. Гос. океаногр. инст., № 17 (29).
- Скопинцев Б. А. 1962. О биохимическом потреблении кислорода в водах северной части Атлантики. Океанол., т. 2, № 6.
- Скопинцев Б. А., А. Г. Бакулина. 1966а. Органическое вещество в водах Череповецкого водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 11 (14).
- Скопинцев Б. А., А. Г. Бакулина. 1966б. Органическое вещество в водах Рыбинского водохранилища в 1964 г. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 13 (16).
- Скопинцев Б. А., А. Г. Бакулина, Е. М. Бикбулатова, Н. А. Кудрявцева, И. Н. Мельникова. 1972. Органическое вещество в воде р. Волги и ее водохранилищ в июне 1966 г. и июле 1969 г. Наст. сб.
- Сорокин Ю. И. и В. К. Федоров. 1969. Определение первичной продукции и деструкции органического вещества в Онежском озере. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 19 (22).
- Толмачев В. А. 1930. Гидрохимия Большой Губы Онежского озера по работам онежской экспедиции летом 1928 г. В кн.: Исследования р. Невы и ее бассейна, вып. 7. Л.
- Форш-Меншуткина Т. Б. 1969. Особенности гидрохимического режима Повенецкого залива. В кн.: Предварительные результаты работ комплексной экспедиции по исследованию Онежского озера, вып. 3. Петрозаводск.

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ И ПОСТУПЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ШЕКСНИНСКИЙ ПЛЕС РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Изучение органического вещества поверхностных вод важно для понимания процессов биологического круговорота веществ, а также для оценки и улучшения питьевых и технических качеств воды.

Воде бассейна р. Шексны — одному из трех главных притоков Рыбинского водохранилища — свойственны высокая цветность и окисляемость, обусловленные высокой залесенностью (81%) и заболоченностью (11%), а также большим количеством торфяных болот (8.0%). Территория водосбора р. Шексны расположена в пределах двух подзон лесной зоны: средне- и южнотаежной. В северной и западной частях до выхода р. Шексны из Белого озера преобладают еловые и сосновые леса. Южнее Белого озера распространены луга и пашни, часто в сочетании с кустарниковой растительностью.

При малой протяженности с севера на юг и с запада на восток и при отсутствии резких контрастов в рельефе и подстилающей поверхности на территории водосбора р. Шексны не наблюдается значительных изменений климатических факторов. Необходимо отметить также отсутствие в верхней части бассейна р. Шексны промышленных центров, которые могли бы загрязнять реку производственными сточными водами.

На поверхности залесенных водосборов за вегетационный период накапливается значительно больше органического вещества, способного образовывать гумусовые кислоты, чем на необлесенных. На последних нет достаточного количества неорганических соединений, способных нейтрализовать органические гумусовые кислоты, что приводит к разрушению поглощающего комплекса почв и способствует растворению и выносу относительно большого количества гумусовых веществ (Воронков и др., 1966). Наиболее резко процесс растворения и выноса неорганических и органических веществ из почвы и коренных пород проявляется в периоды наибольшей увлажненности водосборов — в половодье и во время осенних паводков.

Заметное поступление талых вод на поверхность почвы водосбора начинается вскоре после перехода температуры воздуха через 0°, который, как правило, приходится на середину апреля. Так как почва покрытых лесом водосборов еще не оттаяла, талые воды стекают с большей части их площади по поверхности почвы, преимущественно внутри лесной подстилки, на границе с нижележащим гумусовым горизонтом (Скакальский, 1966), где они растворяют и выносят образующиеся здесь

органические вещества. В то же время талые воды выносят из болот большое количество органических веществ, содержание которых к концу зимы достигает максимума (Воронков и Соколова, 1951).

Аллохтонное органическое вещество, поступающее в Белое озеро, приносят реки Ковжа Белозерская, Кема, Шола и Мегра. Ковжа и Кема дают немного больше половины всего притока в Белое озеро. Преобладающим типом растительности бассейнов перечисленных рек являются хвойные леса (75—81%), кроме того, от 13 до 17% их площади заболочено (Основные гидрологические характеристики, 1967). При таких условиях количество окрашенного органического вещества, поступающего в р. Шексну и Шекснинский плес Рыбинского водохранилища, «отражает связи между физико-географическими особенностями бассейна и режимом самого водоема» (Фортунов, 1959, стр. 246).

Цветность и окисляемость с разной степенью полноты выражают содержание органических веществ: первая характеризует окрашенные вещества терригенного происхождения, вторая, кроме того, малоокрашенные, появившиеся в воде в результате продукционных и деструкционных биологических процессов. Поэтому, несмотря на значительное сходство, полного совпадения этих показателей нет.

Известно, что при отношении цветности к перманганатной окисляемости (в пересчете на кислород), равном примерно пяти, вода содержит гумусовые вещества почвенно-торфяного происхождения. Низкие величины отношения характерны либо для вод с органическими веществами планктонного происхождения, либо для вод, содержащих неокрашенные органические вещества (Скопинцев, 1950; Каган и Гельфер, 1956).

В настоящем сообщении представлены результаты ежедневных наблюдений химической лаборатории Череповецкого городского водопровода за 10 лет (1958—1967 гг.). Место забора воды Череповецкого водопровода расположено значительно выше города и устья р. Ягорбы и в течение большей части года находится в подпоре. Для определения средних величин косвенных показателей органического вещества и некоторых химических характеристик было использовано следующее количество анализов:

Годы	Цветность	Перманганатная окисляемость	Железо	Общая жесткость
1958—1967	2777	2731	2725	2641
В том числе:				
1958—1962	1272	1232	1237	1217
1963—1967	1505	1499	1488	1424

Согласно данным Гидрометеослужбы, среднегодовая величина рН воды в данном районе близка к нейтральной.

Определение цветности производилось путем измерения оптической плотности воды, предварительно центрофугированной со скоростью 6000 об./мин. на фотоэлектроколориметре типа ФЭКН-57 с последующим пересчетом в градусы платиново-кобальтовой шкалы по графику связи. Приведенные показатели за 1958—1962 гг. характеризуют шекснинскую водную массу до создания Шекснинского водохранилища (Буторин, 1965; Ершова, 1965). После сооружения плотины Шекснинского гидроузла в июне 1963 г. выше места водозабора данные по цветности, окисляемости, общей жесткости и железу по существу характеризуют воду нижнего бьефа Шекснинского водохранилища.

Годы, охваченные наблюдениями, различны по водности р. Шексны. Близкими к средней норме были 1958, 1959, 1961, 1965 и 1967 гг., с повышенной водностью — 1962 и 1966 гг., а 1960, 1963 и 1964 гг. оказались маловодными.

В литературе есть данные, указывающие на высокую цветность и окисляемость вод рек Ковжи Белозерской, Шола, Мегры и Кемы (Скопинцев, 1939; Фортунатов, 1970). По данным Гидрометеослужбы, вода р. Кемы (у гидропоста Левково) в 1961 г. характеризовалась очень высокой перманганатной окисляемостью: 29 марта при цветности 29° окисляемость равнялась 40 мг О/л, 7 мая цветность составила 78°, окисляемость — 86.4 мг О/л. В сентябре цветность равнялась 72°, окисляемость — 35.2 мг О/л.

Попадая в озера с относительно малыми проточностью и изменчивостью гидрохимического состава, органические вещества претерпевают существенные изменения — происходит «осветление» воды. Многие авторы объясняют это явление как эффект самоочищения под влиянием биологических процессов и солнечного света (Фортунатов, 1959; Францев, 1959; Gjessing a. Samdal, 1968).

Относительно малые величины всех показателей органического вещества характерны для вод Белого озера (Скопинцев и Бакулина, 1966). Ниже Белого озера окрашенные органические вещества в русло р. Шексны поступают с водой рек Ковжи Шекснинской и Сизьмы. Бассейны этих рек в ландшафтном отношении отличаются от бассейнов северных притоков р. Шексны уменьшением залесенности (в бассейне Ковжи до

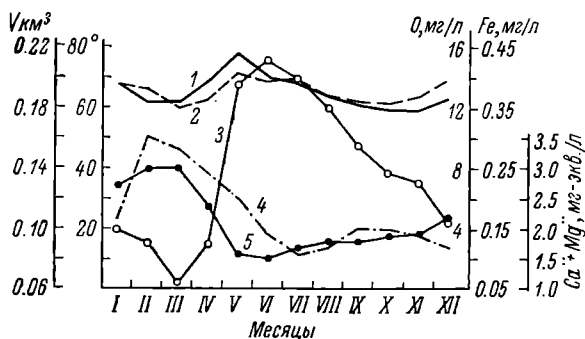


Рис. 1. Изменение цветности, перманганатной окисляемости, железа, общей жесткости и объема воды верхнего участка Шекснинского плеса.

1 — цветность; 2 — перманганатная окисляемость; 3 — объем воды; 4 — Fe_{общ}; 5 — общая жесткость.

64%.) Большие площади в низовье Ковжи и верховье Сизьмы распаханы или частично заняты сенокосами. Однако значительные пойменные участки этих рек покрыты торфяниками и болотами (бассейн Ковжи заболочен на 18%), которые служат постоянным источником образования окрашенного органического вещества.

Весной при таянии снега первыми в район г. Череповца поступают воды с водосбора южной части р. Шексны (ниже Белого озера). Уже в апреле заметно увеличиваются объем воды, цветность и перманганатная окисляемость, а содержание железа и общая жесткость уменьшаются (рис. 1).

Талые воды северных притоков попадают в верхний участок Шекснинского плеса в мае—июне, а иногда поступление этих вод затягивается до сентября. В среднем за десятилетие максимальный объем талой воды в верхнем участке Шекснинского плеса наблюдался в июне.

Концентрация органического вещества в водоеме определяется многими процессами, направленными в сторону как ее увеличения, так и уменьшения. К последним относятся потребление органических веществ микроорганизмами, биохимические превращения, осаждение и др. В половодье окрашенные органические вещества, поступающие в зону подпора, не успевают заметно трансформироваться.

Общий характер сезонной динамики содержания органического вещества за десятилетие следующий. Значительные объемы воды с неуспешными трансформироваться окрашенными и неокрашенными органическими веществами поступали в район г. Череповца только в мае. В годовой динамике цветности отчетливо наблюдалось два максимума (см. рис. 1):

в мае (78°)¹ и в январе (69°). С июня по октябрь цветность уменьшалась. В летний период поступление аллохтонных органических веществ ограничено вследствие уменьшения стока. Осенью поступление аллохтонного органического вещества усиливалось в результате выпадения обильных дождей. В конце осени цветность снова повышалась и достигла максимума в январе. Увеличение цветности в декабре—январе обусловлено, по-видимому, также переходом р. Шексны на питание грунтовой водой, которая залегает на малой глубине и сообщается с болотами. Минимальные величины цветности приходились на октябрь и февраль—март.

С апреля по май одновременно с увеличением цветности растет и перманганатная окисляемость, достигающая максимума в мае — 14 мг О/л. В течение года было отмечено три максимума перманганатной окисляемости. Первый (майский) совпадал с максимумом цветности. Об одновременном увеличении обоих показателей свидетельствует параллельный ход кривых (рис. 1). Это объясняется общностью происхождения органических веществ. Коэффициент отношения цветности к кислороду перманганатной окисляемости, наибольшая величина которого (5.6) наблюдалась в апреле, указывает на преобладание в этот период окрашенных веществ терригенного происхождения. Величина коэффициента отношения цветности к кислороду перманганатной окисляемости за десятилетие изменялась в пределах 2.0—7.0. До 72% случаев приходится на интервал 4.0—6.0. Максимальный объем весенних маломинерализованных вод верхнего участка отмечался в июне и отставал по времени от максимума цветности и окисляемости. Вода, поступающая в район г. Череповца в июне, содержит меньше органических веществ, так как основная их масса была растворена и вынесена в начале половодья. К тому же в июне интенсивно развиваются биологические процессы, способствующие распаду органических веществ. Второй максимум окисляемости приходился на июль. В это время в воде образуется автохтонное органическое вещество — продукты процессов фотосинтеза и распада фитопланктона, максимум которых наблюдается в июле. С августа по октябрь окисляемость уменьшалась, но сохранялось относительно высокое содержание неокрашенных веществ. С октября по декабрь окисляемость снова увеличивалась (до 14.0 мг О/л) — третий максимум (рис. 1). Преобладание неокрашенных веществ сохранялось по декабрь (коэффициент отношения цветности к перманганатной окисляемости равен 4.6). Наличие малоокрашенных и неокрашенных органических веществ и возможность их поступления поздней осенью и в начале зимы можно объяснить влиянием Белого озера, которое является поставщиком диатомового планктона для Рыбинского водохранилища в осенний период (Гусева, 1959), и замедлением биологических процессов распада органических веществ.

Минимальные величины перманганатной окисляемости, так же как и минимальные значения цветности, были отмечены в марте. Содержащиеся в воде органические вещества выносятся за пределы участка при интенсивной предвесенней сработке уровня водохранилища.

В годичном цикле изменений общей жесткости на данном участке наблюдался один максимум и один минимум. График величин общей жесткости представляет собой почти зеркальное отражение соответствующего графика объема воды верхнего участка (рис. 1). Минимальная величина $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$, равная 1.5 мг-экв./л, приходилась на июнь и соответствовала максимуму объема воды. С июля по декабрь объем воды постепенно уменьшался, а содержание $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ увеличивалось. Максимум $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ (3.0 мг-экв./л) наблюдался в феврале—марте и соответствовал

¹ Здесь и ниже приведены среднемноголетние величины.

минимальному объему воды и минимальным величинам цветности и окисляемости.

Содержание общего железа невелико (рис. 1). Его минимум (0.11 мг/л) приходился на июль и по времени совпадал со вторым максимумом перманганатной окисляемости. С августа содержание железа увеличивалось и достигало максимума (0.36 мг/л) в апреле — к началу половодья.

Как видно из рис. 1, изменения средних показателей цветности и окисляемости по сезонам довольно монотонны и мало наглядны. Поэтому представлялось целесообразным дать картину сезонных изменений показателей после пересчета их на объем воды верхнего участка плеса. Одновременно этим достигается и более четкая характеристика размера указанных изменений и их связь с динамикой объема воды данного участка. Кроме того, такие данные необходимы для балансовых расчетов.

Для пересчета содержания органического вещества на объем воды верхнего участка мы воспользовались данными А. В. Фотиева (1966): 1 мг гумуса, растворенного в 1 л воды, увеличивает цветность последней на 5° (при pH 7). Величина отношения перманганатной окисляемости к органическому углероду, равная в среднем для Шекснинского плеса единице (Скопинцев и Бакулина, 1966), позволила определить поступление и количество органического углерода. Данные о количестве органического углерода интересны тем, что в составе органического вещества природных вод на его долю приходится около 50% (Скопинцев, 1950). Объемы воды на участке были рассчитаны в соответствии с данными К. А. Бакулина (1968).

Из данных табл. 1 видно, что количество окрашенных гумусовых веществ почти равно количеству органического углерода. Максимальное несовпадение этих величин отмечалось в апреле, когда поступило больше окрашенных гумусовых веществ, и в декабре, когда, наоборот, поступило больше органического углерода. С апреля по июнь количество окрашенных гумусовых веществ превышало содержание $C_{орг.}$; с июля по февраль имело место обратное явление.

Т а б л и ц а 1

Динамика поступления органических веществ в верхний участок
Шекснинского плеса

Месяц	Объем, км ³	Цвет- ность, град.	Окрашенные гумусовые вещества, т	Перманганат- ная окисляемость, мг О/л	$C_{орг.}$, т	Окрашенные гумусовые вещества $C_{орг.}$
Январь	0.0965	68	1312	13.6	1312	1.0
Февраль	0.0868	62	1076	13.2	1146	0.99
Март	0.0640	62	794	12.1	774	1.03
Апрель	0.0870	69	1200	12.3	1070	1.12
Май	0.1950	78	3042	14.4	2808	1.08
Июнь	0.2110	70	2954	13.7	2891	1.02
Июль	0.1990	68	2706	13.9	2766	0.98
Август	0.1800	64	2304	12.7	2286	1.01
Сентябрь	0.1540	61	1879	12.4	1909	0.98
Октябрь	0.1380	59	1628	12.4	1711	0.95
Ноябрь	0.1310	59	1546	12.8	1677	0.92
Декабрь	0.1140	63	1436	14.0	1596	0.90
Всего за год	—	—	21877	—	21946	≤1.0

Весной с водами половодья в водохранилище вносится большое количество органических веществ; максимум окрашенных органических веществ (3042 т) приходится на май, а максимум органического углерода

(2890 т) — на июнь. В мае—июне наблюдалось максимальное поступление аллохтонного органического вещества в зону замедленного водообмена. Значительное количество его продолжало поступать в район г. Череповца даже в течение летних месяцев, поскольку половодье на р. Шексне очень растянуто (табл. 1; рис. 2). На летние месяцы (июнь—август) приходится более 35% годового количества органических веществ (см. ниже):

Сезон	Окрашенные гумусовые вещества, %	Органический углерод, %
Январь—март	14.6	14.7
Апрель—май	19.4	17.7
Июль—август	36.4	36.2
Сентябрь—октябрь	16.0	16.5
Ноябрь—декабрь	13.6	14.9

В результате сезонного изменения гидрологического режима возникают и действуют факторы уменьшения и качественного изменения органических веществ. С постепенным прогреванием водной толщи усиливаются продукционные и деструкционные процессы, обуславливающие поступление в водоем автохтонных органических веществ. Начиная с июня количество гумусовых веществ уменьшалось и достигало минимума в марте. При повышении температуры воды выше 12° основную роль в разрушении окрашенного органического вещества играют биологические процессы (Gjessing a. Samdal, 1968; Марголина, 1969).

Количество органического углерода уменьшалось с июля и достигло минимума (774 т) в марте. Минимальное содержание окрашенных гумусовых веществ и органического углерода совпадало с минимумом объема воды на данном участке. По данным за десятилетие, за год в верхний участок Шекснинского плеса в среднем поступало 21 871 т окрашенных гумусовых веществ.

Ниже предпринята попытка выяснить влияние зарегулирования стока р. Шексны на динамику органического вещества в районе водозабора.

До создания Шекснинского водохранилища максимум поступления органических веществ приходился на май (табл. 2; рис. 3), опережая на месяц максимум объема воды в данном участке. С июня и до начала половодья следующего года их количество уменьшалось, достигая минимума в марте, который совпадал с минимальным объемом воды на участке. С апреля по август наблюдалось преобладание количества окрашенных веществ по сравнению с количеством органического углерода, и максимальная разность этих величин приходилась на август (рис. 3; табл. 2). С октября по март органического углерода поступило больше, чем окрашенных гумусовых веществ, о чем свидетельствует величина отношения

$$\frac{C_{\text{орг.}}, \text{ т}}{C_{\text{окр.}}, \text{ т}}$$

(табл. 2).

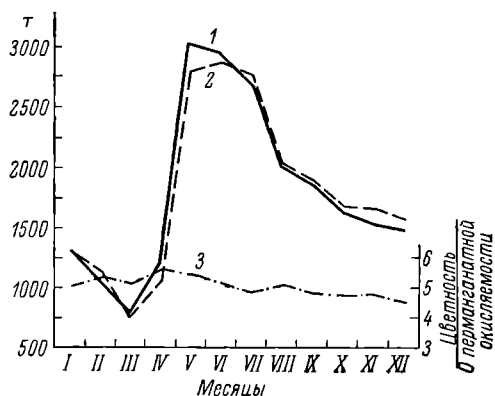


Рис. 2. Изменение количества органических веществ в верхнем участке Шекснинского плеса.

1 — окрашенные гумусовые вещества; 2 — $C_{\text{орг.}}$; 3 — коэффициент цветности по кислороду перманганатной окисляемости.

Динамика поступления органических веществ в верхний участок Шекснинского плеса до и после создания Шекснинского водохранилища

Месяц	До зарегулирования р. Шексны						После зарегулирования р. Шексны					
	объем, км ³	цветность, град.	окрашен- ные гумусовые вещества, т	О, мг/л	Сорг., т	окрашенные гумусовые вещества, т Сорг., т	объем, км ³	цветность, град.	окрашен- ные гумусовые вещества, т	О, мг/л	Сорг., т	окрашенные гумусовые вещества, т Сорг., т
I	0.105	52	1092	11.8	1239	0.88	0.090	80	1440	15.0	1350	1.07
II	0.086	60	1032	13.2	1135	0.91	0.077	76	1170	13.2	1016	1.15
III	0.070	58	812	12.9	903	0.90	0.060	64	768	11.6	696	1.10
IV	0.091	68	1238	13.5	1228	1.01	0.084	70	1176	11.4	958	1.23
V	0.213	77	3280	15.1	3216	1.02	0.177	79	2797	13.7	2425	1.15
VI	0.221	72	3182	13.5	2983	1.07	0.200	69	2760	13.9	2780	0.99
VII	0.210	73	3066	13.8	2898	1.06	0.189	62	2344	13.9	2627	0.89
VIII	0.195	64	2496	11.8	2301	1.08	0.166	63	2092	13.5	2241	0.93
IX	0.171	61	2086	12.0	2052	1.01	0.137	61	1671	12.8	1754	0.95
X	0.159	58	1844	12.1	1924	0.96	0.117	61	1427	12.7	1486	0.96
XI	0.153	56	1714	12.0	1836	0.93	0.110	64	1408	13.5	1485	0.95
XII	0.131	57	1493	13.2	1729	0.86	0.097	69	1338	14.8	1436	0.93
Среднее за год	0.150	63	1890	12.8	1920	0.98	0.125	68	1700	13.4	1675	1.01

В годовой динамике общей жесткости отмечался летний минимум, совпадавший с максимальным объемом воды участка, и зимний максимум, который приходился на февраль. С марта по июнь содержание $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ понижалось, а с июля по февраль — повышалось (рис. 4).

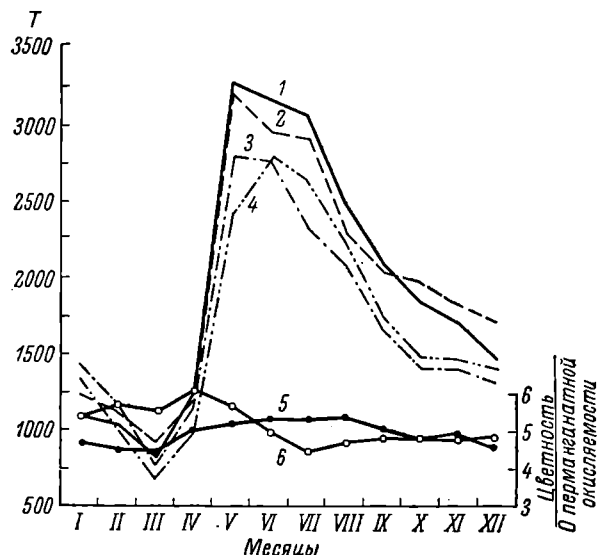


Рис. 3. Изменение количества органических веществ в верхнем участке Шекснинского плеса до и после зарегулирования р. Шексны.

1 — окрашенные гумусовые вещества до зарегулирования р. Шексны; 2 — $C_{\text{орг.}}$ до зарегулирования р. Шексны; 3 — окрашенные гумусовые вещества после зарегулирования р. Шексны; 4 — $C_{\text{орг.}}$ после зарегулирования р. Шексны; 5 — коэффициент $\frac{\text{цветность}}{\text{О перманганатной окисляемости}}$ до зарегулирования р. Шексны; 6 — этот же коэффициент после зарегулирования р. Шексны.

Минимальное содержание железа отмечалось в июле, а с августа оно постепенно увеличивалось и достигало максимума (0.40 мг/л) в апреле, опережая максимальные величины цветности и перманганатной окисляемости (рис. 4).

После создания Шекснинского водохранилища прежде всего уменьшился объем стока в створе ГЭС на 22.6% по сравнению со стоком незарегулированной Шексны в створе дер. Черная Гряда. В связи с этим сократился и объем воды, заполняющей верхний участок (на 16.6%). Не столь значительно уменьшилось количество органических веществ, поступающих в верхний участок Шекснинского плеса через ГЭС и шлюзы Шекснинского гидроузла: окрашенных веществ — всего на 10.0%, органического углерода — на 12.8%. Иными словами, произошло увеличение цветности и окисляемости, очевидно, в связи с тем, что были залиты заболоченные пространства, явившиеся дополнительным источником поступления органических веществ (табл. 2). Максимум поступления окрашенных веществ приходился также на май, а органического углерода — на июнь. Запаздывание связано, по-видимому, с пониженной температурой полной воды, которая задерживает развитие продукционно-деструкционных процессов. С опозданием на месяц начинают усиливаться биологические процессы продуцирования автохтонного органического вещества. После достижения максимума и до начала половодья следующего

Изменение среднегодовых показателей содержания и количества ингредиентов химического состава в воде верхнего участка после зарегулирования стока Шексны

Показатель	До зарегулирования р. Шексны	После зарегулирования р. Шексны	Изменение, %
Объем воды верхнего участка, км ³	0.150	0.125	16.6
Цветность, град.	63	68	—
Количество окрашенных гумусовых веществ в объеме воды участка, т	1890	1700	10.0
Окисляемость, мг О/л	12.8	13.4	—
Количество $C_{орг.}$ в объеме воды участка, т	1920	1675	12.8
Содержание Fe, мг/л	0.17	0.19	—
Количество Fe в объеме воды уча- стка, т	2.426	2.082	14.2
Общая жесткость ($Ca^{++}+Mg^{++}$), мг-экв./л	2.26	2.03	—
Количество $Ca^{++}+Mg^{++}$ в объеме воды участка, т	30.87	23.92	22.5 *

* Уменьшение количества $Ca^{++}+Mg^{++}$ произошло за счет аккумуляции преимущественно талых вод в верхнем бьефе водохранилища.

года, так же как и до зарегулирования стока р. Шексны, происходило уменьшение количества органических веществ (до минимума в марте). В годовой динамике коэффициента отношения цветности к окисляемости произошли существенные изменения (рис. 3), свидетельствующие о качественном

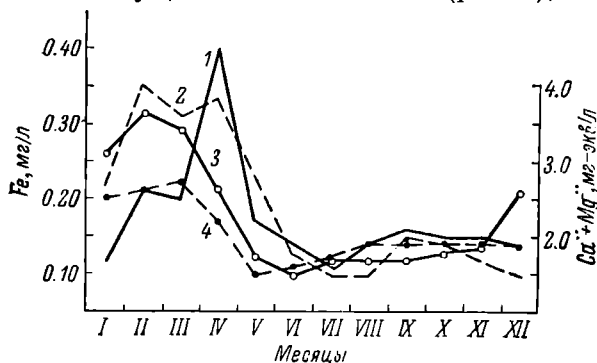


Рис. 4. Содержание железа и общей жесткости выше г. Череповца до и после зарегулирования р. Шексны.

1 — $Fe_{общ.}$, 3 — $Ca^{++}+Mg^{++}$ — до зарегулирования р. Шексны; 2, 4 — те же показатели после зарегулирования р. Шексны.

до зарегулирования с мая по сентябрь наблюдалось преобладание окрашенных веществ. По-видимому, Шексинское водохранилище выполняет в этот период роль отстойника.

В годовом изменении величин общей жесткости (рис. 4) произошли следующие изменения: минимум жесткости приходится не на апрель, как до зарегулирования стока р. Шексны, а на май. В летние месяцы общая жесткость увеличивалась, оставаясь неизменно равной 1.9 мг-экв./л с августа по декабрь, в январе—марте она уменьшалась по сравнению с этим же периодом до зарегулирования Шексны.

ном изменении органических веществ. В течение первой половины года наблюдалось преобладание окрашенных веществ, в то время как до создания Шексинского водохранилища с января по апрель преобладал органический углерод (рис. 5). Максимальные величины коэффициента отмечались не в августе, как до зарегулирования р. Шексны, а в апреле. С июня по декабрь устойчиво преобладал органический углерод, тогда как

наблюдалось преобладание

Содержание общего железа после зарегулирования с июня по декабрь уменьшилось, а в зимние месяцы (январь—март) — увеличилось (рис. 4). В процентном распределении количества железа по сезонам

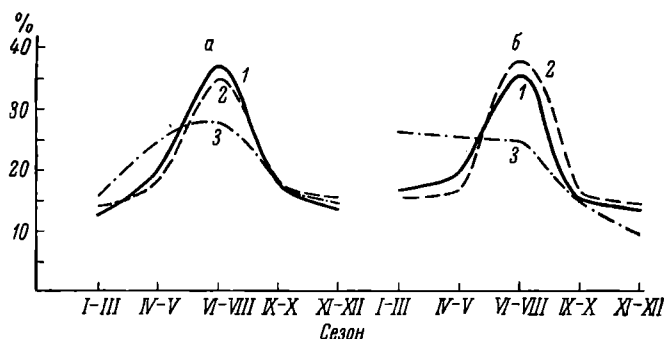


Рис. 5. Поступление органических веществ по сезонам (в процентах от годового количества) до зарегулирования р. Шексны (а) и после ее зарегулирования (б).

1 — окрашенные гумусовые вещества; 2 — органический углерод; 3 — $Fe_{общ}$.

после зарегулирования р. Шексны также произошли изменения (рис. 5). В заключение приводим краткую таблицу среднегодовых показателей и количества ингредиентов химического состава воды данного участка (табл. 3).

ВЫВОДЫ

Воды, питающие р. Шексну в районе Череповецкого водозабора, характеризуются повышенной цветностью и окисляемостью. Средние показатели цветности воды за год изменяются в пределах $60-80^\circ$, а окисляемости — в интервале $11.0-14.7$ мг О/л. В общем количестве органических веществ преобладают гумусовые вещества почвенно-торфяного происхождения. После зарегулирования стока р. Шексны произошло расхождение в сроках весенних пиков цветности и перманганатной окисляемости.

В общем за десятилетие (1958—1967 гг.) максимальные величины показателей органического вещества воды характерны для мая. Максимальное поступление окрашенных веществ также наблюдалось в мае, тогда как органического углерода — в июне. Минимальное содержание органического вещества отмечалось в марте.

В среднем за десятилетие в составе органических веществ воды данного участка окрашенные соединения преобладали в пределах первого полугодия. В июле относительно увеличивалось содержание слабоокрашенного вещества, а с сентября по декабрь устойчиво преобладали малоокрашенные соединения.

После создания Шексинского водохранилища в 1963 г. значения показателей содержания органического вещества в единице объема воды увеличились, а их общее количество на участке уменьшилось в связи с сокращением объема поступающей воды.

До зарегулирования р. Шексны относительное преобладание малоокрашенных веществ было характерно для периода с октября по март, после зарегулирования — с июля по декабрь. В остальное время года относительно увеличивалась доля окрашенных органических веществ.

Автор выражает глубокую признательность начальнику Управления «Водоканал» г. Череповца С. В. Эльковскому и заведующему производ-

ственным отделом Н. И. Левиту за любезно предоставленные материалы, младшему научному сотруднику ИБВВ АН СССР А. В. Фотиеву за ценные сведения о гумусовом эквиваленте цветности.

ЛИТЕРАТУРА

- Бакулин К. А. 1968. Морфометрические характеристики Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 16 (19).
- Буторин Н. В. 1965. К изучению водных масс Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (10).
- Воронков П. П. и О. К. Соколова. 1951. Сезонные изменения состава гумусовых веществ в водах Карельского перешейка. Тр. Гос. гидрол. инст., вып. 33 (87).
- Воронков П. П., О. К. Соколова, В. И. Зубарева, В. И. Найденова. 1966. Гидрохимические особенности местного стока в период весеннего половодья и почвенного покрова водосборов европейской территории СССР. Тр. Гос. гидрол. инст., вып. 137.
- Гусева К. А. 1959. Роль Белого озера в формировании фитопланктона Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2 (5).
- Ершова М. Г. 1965. Распределение вод различного происхождения в Рыбинском водохранилище в весенний период. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (10).
- Каган Ц. А. и Е. А. Гельфер. 1956. Характеристика гумусовых веществ некоторых водоемов Полесья (р. Припять и некоторые ее притоки). Тр. Комплексн. эксп. по изуч. водоемов Полесья, Минск.
- Марголина Г. Л. 1969. Интенсивность процессов бактериального разрушения органических веществ в водохранилищах. Автореф. канд. дисс. М.
- Основные гидрологические характеристики. 1967. Т. X. Л.
- Скакальский Б. Г. 1966. Основные географические и гидрохимические характеристики местного стока различных природных зон европейской территории СССР. Тр. Гос. гидрол. инст., вып. 137.
- Скопинцев Б. А. 1939. Гидрохимическая характеристика каналов и рек Мариинской системы. Гидрохим. матер., т. 11.
- Скопинцев Б. А. 1950. Органическое вещество в природных водах (водный гумус). Тр. Гос. океаногр. инст., № 17 (29).
- Скопинцев Б. А. и А. Г. Бакулина. 1966. Органическое вещество в водах Рыбинского водохранилища в 1964 г. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 13 (16).
- Фортунатов М. А. 1959. Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатели его режима. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2 (5).
- Фортунатов М. А. 1970. Цветность и прозрачность воды верхневолжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 19 (22).
- Фотиев А. В. 1966. К методике выделения гумусовых веществ из болотных вод. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 13 (16).
- Францев А. В. 1959. Очистной эффект Учинского водохранилища и некоторые пути его повышения. Тр. VI совещ. по проблемам биол. внутр. вод, М.—Л.
- Gjessing E. T. and I. E. Samdal. 1968. Humic substances in water and the effect of impoundment. Journ. Amer. Water Works Assoc., No 4.
-

СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА В РЫБИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ В ЛЕТНЕ-ОСЕННИЙ ПЕРИОД

Сбор материала проводился на Рыбинском водохранилище в июле и октябре 1965 г. При анализе проб воды применялись те же методы, что и в предыдущих исследованиях (Трифонова, 1971).

Как показали результаты анализов (табл. 1 и 2), летом общее содержание азота в Рыбинском водохранилище колебалось в пределах 1.0—2.4 мг N/л в натуральной воде и 0.85—1.71 мг N/л в фильтрованной, что несколько превышало содержание его в зимний и весенний периоды. Летом основной формой азота был азот органический, количество которого достигало 98% от общего азота. Содержание аммонийного азота, как правило, не превышало 0.10—0.15 мг N/л в поверхностных горизонтах и 0.2—0.3 мг N/л в придонных. Количество нитратного азота обычно измерялось сотыми или даже тысячными долями мг N/л и только в волжских водах достигало нескольких десятых мг N/л. Содержание органического вещества также колебалось в довольно широких пределах (табл. 1) и сопровождалось изменениями величины отношения C/N¹ от 6 до 15.

К октябрю содержание органического вещества в воде Рыбинского водохранилища немного снизилось, но все же оставалось еще сравнительно высоким (табл. 2). Состав органического вещества несколько изменился и характеризовался более высоким отношением C/N — 8—24. Общее содержание азота в это время уменьшилось до 0.9—1.76 мг N/л, но органический азот составлял еще большую часть — 68—91%. Количество минеральных форм азота было невелико: концентрация аммонийного азота выражалась, как правило, сотыми долями мг N/л, нитритов — тысячными и только содержание нитратов повысилось до 0.1—0.4 мг N/л. Количество взвешенных веществ возросло незначительно и характеризовалось величинами от 5 до 23 мг/л. Взвеси в основном имели минеральный характер, так как увеличение мутности, наблюдаемое в ряде районов Рыбинского водохранилища, не сопровождалось возрастанием ни окисляемости, ни содержания хлорофилла.

Работами сотрудников Института биологии внутренних вод АН СССР (Фортунатов, 1959; Казаровец, 1960; Буторин, 1965, 1966) установлено наличие в составе вод Рыбинского водохранилища водных масс, разли-

¹ Согласно данным Б. А. Скопинцева и А. Г. Бакулиной (1966), содержание органического углерода в Рыбинском водохранилище обычно соответствует перманганатной окисляемости, выраженной в мг O/л. Исходя из этого, мы сочли возможным для определения отношения C/N использовать величины концентрации C, рассчитанные по перманганатной окисляемости.

Результаты химического анализа вод Рыбинского водохранилища в июле 1965 г.

Место отбора проб	Глубина, м	Горизонт, м	Температура, °С	Электропроводность, мксим/см	рН	О ₂ , мг/л	N, мг/л				C/N	Окисляемость, мг О ₂		Цветность, град.	Взвешенные вещества, мг/л	Хлорофилл, мкг/л	
							об-щий	органический	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻		NO ₃ ⁻	перманганатная				биохимическая
Моложские воды																	
У дер. Новые Липенки	6.0	3.0	—	195	7.60	7.37	1.48	1.36	0.11	0.001	0.005	18.3	43.5	105	4.1	1.8	
У дер. Малиновки.	14.0	0.5	17.4	166	7.55	7.88	1.60	1.47	0.12	0.002	0.008	16.5	46.0	75	4.0	2.2	
		13.5	—	168	7.55	7.71	1.55	1.27	0.27	0.002	0.008	13	44.5	77	4.4	2.2	
Шекснинские воды																	
У сел. Устье Угольское	17.0	0.5	17.6	116	7.25	9.55	1.07	0.92	0.12	0.005	0.025	15	38.5	63	2.8	4.1	
		16.5	—	117	7.22	9.52	1.09	0.90	0.18	0.005	0.005	15	38.5	65	2.6	—	
У затопленного с. Олехова	14.0	0.5	20.3	125	8.69	12.70	2.40	2.36	0.04	0.001	0.000	6	50.5	65	24.4	46.8	
		13.5	17.0	133	7.48	8.41	1.49	1.39	0.09	0.001	0.005	9	34.0	58	10.1	9.0	
Волжские воды																	
У г. Углича	10.0	9.5	18.2	175	7.48	6.68	1.25	0.98	0.07	0.002	0.20	15	38.5	70	4.6	3.8	
У сел. Коприна	15.0	0.5	18.8	174	7.55	7.43	1.69	1.42	0.12	0.002	0.15	10	32.5	60	12.2	3.3	
		14.5	—	175	7.55	7.30	1.92	1.62	0.15	0.007	0.14	9	39.4	60	14.7	—	
Воды центральной части водохранилища																	
У сел. Брейтова	15.0	0.5	17.4	164	7.78	8.58	1.39	1.29	0.00	0.005	0.10	8	31.0	42	4.9	8.2	
		14.5	—	164	7.78	8.10	1.27	1.10	0.07	0.010	0.09	10	37.0	47	5.7	7.4	
У затопленного плеса Ягорба	16.5	0.5	17.3	160	7.82	8.80	1.00	0.80	0.12	0.002	0.08	12.5	35.5	50	3.1	5.3	
		16.0	17.0	162	7.55	7.80	1.89	1.71	0.08	0.003	0.10	6	40.5	45	8.5	10.2	
В сбросном плесе у дер. Милушино	19.0	0.5	17.4	177	7.86	8.80	1.18	0.95	0.03	0.010	0.19	10.5	29.5	43	5.4	—	
		18.5	17.4	177	—	8.74	1.63	1.28	0.05	0.010	0.29	8	32.5	45	6.2	9.9	

Результаты химического анализа вод Рыбинского водохранилища в октябре 1965 г.

Место отбора проб	Глубина, м	Горизонт, м	Температура, °С	Электропроводность, мксим/см	pH	N, мг/л				C/N	Окисляемость, мг О/л		Цветность, град.	Взвешенные вещества, мг/л	Хлорофилл, мг/л	
						общий	органический	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻		NO ₃ ⁻	перманганатная				биохимическая
Моложские воды																
У сел. Модинского . .	3.5	0.5	1.6	209	7.80	0.90	0.61	0.19	0	0.10	24	15.0	35.3	85	4.7	3.3
Шекснинские воды																
У сел. Устье Угольское	5.5	0.5	4.2	134	7.45	1.53	1.27	0.09	0.002	0.17	10	13.2	33.8	60	8.1	1.5
Волжские воды																
У г. Углича	10.0	0.5	7.2	214	7.45	1.75	1.54	0.01	0.005	0.20	9	13.4	36.3	57	4.8	1.5
У сел. Коприна . . .	15.0	0.5	5.2	186	7.36	1.60	1.28	0.02	0.005	0.30	10	12.4	—	50	9.3	2.0
	14.5	14.5	—	188	7.36	1.33	1.03	0.02	0.005	0.28	12	12.4	36.9	50	23.4	3.8
Воды центральной части водохранилища																
У сел. Брейтова . . .	14.0	0.5	4.2	159	7.50	1.42	0.93	0.01	0.002	0.18	12	11.0	32.6	45	10.8	—
У затопленного плеса Ягорба	14.5	0.5	3.7	154	7.45	1.62	1.38	0.02	0.002	0.22	8	11.2	—	45	14.8	—
		14.0	3.7	155	7.55	1.01	0.82	0.005	0.002	0.18	13	10.5	27.7	48	5.8	4.5
У затопленного с. Наволок	10.0	0.5	2.7	160	7.55	0.89	0.72	0.005	0.002	0.16	15	10.5	26.1	48	6.3	3.0
		9.5	2.8	161	7.50	1.18	1.07	0.02	0.001	0.09	10	11.0	33.8	53	11.1	4.5
В сбросном плесе у дер. Милушино	21.0	0.5	3.8	158	7.45	1.04	0.84	0.02	0.004	0.18	13	10.8	32.3	53	10.6	3.8
		20.5	3.8	159	7.40	1.29	0.95	0.04	0.004	0.30	12	11.1	37.8	50	22.8	2.4
															21.7	3.8

чающихся по характеристикам и происхождению, а также существование вполне определенной сезонной зависимости в распределении водных масс.

Мы попытались выяснить, влияет ли распределение водных масс в Рыбинском водохранилище на распределение соединений азота. В предыдущей работе (Трифорова, 1971) было показано, что в зимний и весенний периоды изменения по акватории водохранилища как в содержании общего азота, так и в соотношении его форм обусловлены главным образом распределением водных масс.

В июле 1965 г. распределение водных масс и величины их цветности и электропроводности были примерно такими же, как и в предыдущие годы (Буторин, 1966), и мало различались между собой. Результаты химического анализа, приведенные в табл. 1, свидетельствуют о том, что и по содержанию соединений азота различия вод разного происхождения также были невелики. На разных станциях или горизонтах в пределах одной и той же водной массы колебания в содержании азота и соотношении отдельных его форм были более значительными и сопровождались различиями в количестве и характере взвешенных веществ, а также величин C/N .

Осенью, несмотря на интенсивное ветровое перемешивание, полного смешения водных масс не происходит, и хотя по цветности воды разного происхождения в этом сезоне довольно близки между собой, различия в электропроводности, наоборот, более заметны, чем в летний период (Буторин, 1966).

В октябре 1965 г. распределение водных масс и характер соотношения электропроводности вод были в основном такими же, как и в предыдущие годы, лишь шекснинские воды, как и в летний период, отличались более низкими величинами электропроводности, что, вероятно, связано с зарегулированием р. Шексны.

Наблюдения показали, что по содержанию соединений азота, органических веществ и другим химическим показателям различия между водами разного происхождения осенью были также сравнительно невелики.

Наиболее своеобразными, как и в другие сезоны, оказались моложские воды. Они характеризовались наибольшей цветностью, более высоким, чем другие воды, содержанием органического вещества с максимальным для этого сезона отношением C/N , равным 24, слегка повышенной концентрацией аммонийного азота (0.19 мг N/л) и сравнительно низким содержанием органического азота (0.61 мг N/л).

В волжских и шекснинских водах содержание соединений азота было более высоким, окрашенных органических веществ — более низким, чем в моложских водах, а величины отношения C/N наименьшими — 9—13.

Воды центральной части водохранилища мало отличались от волжских и шекснинских. Количество соединений азота и органических веществ в них было несколько меньше, а величина отношения C/N немного выше, чем в волжских и шекснинских водах.

В связи со значительным уменьшением количества фитопланктона различия в содержании общего азота и отдельных его форм, нередко наблюдаемые летом на разных станциях в пределах одной водной массы, осенью значительно уменьшились.

Таким образом, в осенний период распределение вод лишь в малой степени влияет на распределение соединений азота. В летний же период воды различного происхождения почти не различаются по содержанию соединений азота и органического вещества. На разных станциях или горизонтах в пределах одной и той же водной массы различия в содержании азота и соотношении отдельных его форм более заметны.

В июле в Рыбинском водохранилище не наблюдалось какой-либо определенной зависимости содержания органического азота от общего содержания органического вещества (рис. 1).

Чтобы выявить некоторые факторы, влияющие на содержание в воде органического азота, необходимо исключить маскирующее действие ряда других причин. С этой целью расчетным путем пробы уравнивались по величине одного из показателей. Расчетное уравнивание производилось таким образом, что другие показатели изменялись пропорционально изменению концентрации уравниваемого компонента. В результате соотношение компонентов химического состава воды не менялось. Так, если уравнивали пробы по содержанию хлорофилла и приводили их к концентрации, равной 1 мкг/л, то в пробе с концентрацией хлорофилла 10 мкг/л все показатели анализа делились на 10, а в пробе с содержанием хлорофилла 0.5 мкг/л — на 0.5. Таким образом, соотношение компонентов оставалось прежним, влияние же на них содержания хлорофилла устранялось.

Используя расчетный способ для уравнивания проб по содержанию органического вещества, выраженного в углероде, мы попытались выявить зависимость содержания органического азота от величины цвет-

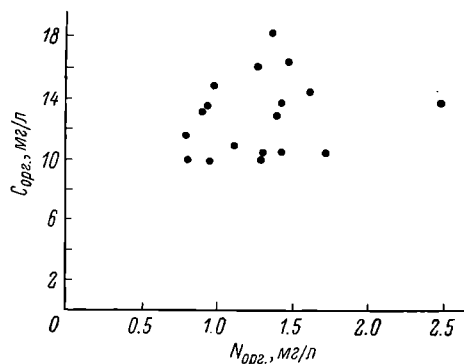


Рис. 1. Отношение содержания органического азота к содержанию органического углерода в воде Рыбинского водохранилища.

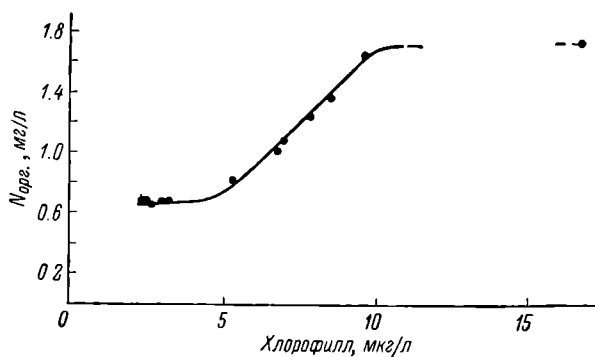


Рис. 2. Характер зависимости содержания органического азота от содержания хлорофилла при постоянной концентрации органического углерода, равной 10 мг/л.

ности и содержания хлорофилла. В летний период воды Рыбинского водохранилища почти не различаются по цветности. Вероятно, поэтому отчетливо выраженной зависимости содержания органического азота от содержания окрашенного органического вещества выявить не удалось. Но этот метод расчета позволил установить существование зависимости содержания органического азота от количества хлорофилла (рис. 2). В определенных пределах количество органического азота находится в прямой зависимости от доли участия органического вещества планктонного происхождения в общем его содержании, т. е. зависит от состава органического вещества.

Некоторое представление о составе органического вещества дает отношение C/N , колеблющееся летом в Рыбинском водохранилище в пределах 6—15. Используя изложенный расчетный способ, мы уравнили пробы по содержанию хлорофилла и построили график зависимости величины отношения C/N от величины цветности. Как видно из рис. 3, при постоянном содержании хлорофилла (1 мкг/л) величина C/N в пределах 6—15 пропорциональна величине цветности, а при постоянной

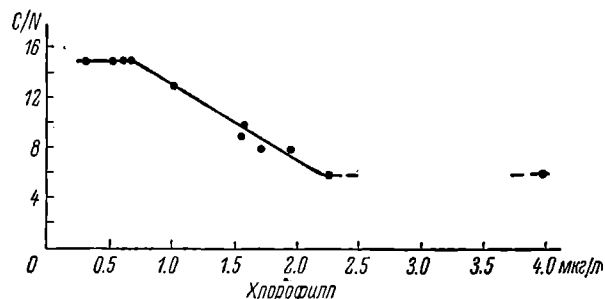


Рис. 3. Характер зависимости величины отношения C/N от концентрации хлорофилла при постоянной величине цветности, равной 10° .

цветности (рис. 4) она обратно пропорциональна содержанию хлорофилла. Но, как уже отмечалось, зависимость величины отношения C/N от содержания хлорофилла и величины цветности сохраняется лишь в определенных пределах изменений C/N , выше и ниже которых увеличение содержания хлорофилла (или цветности) не влияет на величину этого отношения.

Такой характер зависимости может быть объяснен следующим образом. В летний период органическое вещество Рыбинского водохранилища

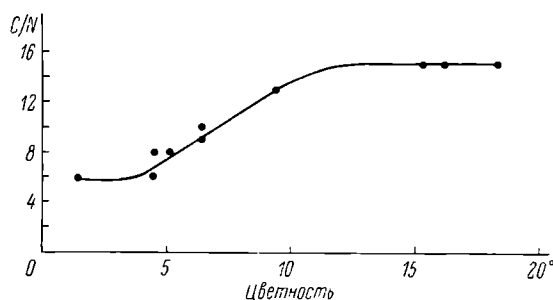


Рис. 4. Характер зависимости величины отношения C/N от величины цветности при постоянной концентрации хлорофилла, равной 1 мкг/л.

характеризуется величиной C/N , близкой к 15. При развитии фитопланктона, в особенности при цветении водоема, в воде появляется органическое вещество планктонного происхождения, имеющее отношение C/N , близкое к 6 (Бордовский, 1964). Повышение доли участия планктонного органического вещества в общем содержании органического вещества в воде снижает величину отношения C/N . При этом она уменьшается пропорционально содержанию фитопланктона, учитывавшегося нами по количеству хлорофилла. При величине C/N , близкой к 6, практически все органическое вещество, содержащееся в воде, представляет собой планктонное органическое вещество. Дальнейшее увеличение количества

фитопланктона ведет лишь к повышению общего содержания органического вещества, но уже не влияет на его состав и величину отношения C/N.

Характер зависимости величины отношения C/N от величины цветности объясняется аналогичным образом.

Влияние взвешенных веществ на содержание в воде соединений азота в летний период определяется главным образом составом взвесей: количество азота резко повышается там, где содержатся взвешенные вещества планктонного происхождения. На станциях, где повышение содержания взвешенных веществ не сопровождалось повышением содержания хлорофилла, наблюдалось очень небольшое увеличение органического азота. Максимальное содержание азота (органического — до 2,36 мг/л и общего — до 2,4 мг/л) наблюдалось в местах интенсивного цветения сине-зеленых. Там же отмечено минимальное содержание минеральных форм азота.

ВЫВОДЫ

1. В летний период основным фактором, определяющим содержание и распределение различных форм азота в Рыбинском водохранилище, является фотосинтезирующая деятельность фитопланктона.

2. Распределение водных масс и общее содержание органических веществ не оказывают в этот период существенного влияния на концентрацию, распределение и формы соединений азота.

ЛИТЕРАТУРА

- Б о р д о в с к и й О. К. 1964. Накопление и преобразование органического вещества в морских осадках. М.
- Б у т о р и н Н. В. 1965. К изучению водных масс Рыбинского водохранилища. В кн.: Динамика водных масс водохранилищ. Л.
- Б у т о р и н Н. В. 1966. Сезонные изменения характеристик водных масс и распределение их в Рыбинском водохранилище. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 12 (15).
- К а з а р о в е ц Н. М. 1960. Применение кондуктометрического метода к изучению распределения водных масс Рыбинского водохранилища. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 7.
- С к о п и н ц е в Б. А. и А. Г. Б а к у л и н а. 1966. Органическое вещество в водах Рыбинского водохранилища в 1964 г. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 13 (16).
- Т р и ф о н о в а Н. А. 1971. Распределение соединений азота в Рыбинском водохранилище в зимне-весенний период. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 20 (23).
- Ф о р т у н а т о в М. А. 1959. Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатели его режима. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2 (5).
-

ЭЛЕМЕНТЫ БАЛАНСА БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В КУЙБЫШЕВСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

В связи с регулированием стока рек Волги и Камы произошли заметные изменения режима биогенных и органических веществ не только в созданных водохранилищах, но и на участках рек ниже гидротехнических сооружений. Изучение этих изменений, являющихся основой биологической продуктивности водоемов, имеет большое научное и практическое значение.

Большой интерес представляют сведения о содержании биогенных и органических веществ в воде основных рек, питающих водохранилище, а также о тех изменениях, которые происходят после регулирования на участках ниже плотины.

В отношении каскада волжских водохранилищ данный вопрос изучен недостаточно. Проведенные исследования ограничивались лишь изучением стока веществ на Нижней и Средней Волге после создания Волгоградского и Куйбышевского водохранилищ (Зенин, Проценко, 1961; Зенин и др., 1964; Гусева, 1961, 1966, 1968; Барсукова, 1965, 1967; Гусева, Анисимова, 1971).

Некоторое представление об элементах баланса биогенных веществ Куйбышевского водохранилища получено нами впервые в 1966—1968 гг. Наблюдения проводились на трех замыкающих створах рек: на Волге у г. Чебоксар, на Каме у сел. Соколки Горы и в нижнем бьефе Волжской ГЭС им. В. И. Ленина (непосредственно у плотины).

Пробы воды отбирались с поверхностного слоя основного потока (0—0.5 м), в реках с помощью батометра и в нижнем бьефе — с дамбы непосредственно у турбин.

Анализ воды производился согласно методике, описанной О. А. Алекиным (1954). Органический азот определялся по Кьельдалю (Дышко, 1953) и видоизмененному методу Конвея (Пашанова и др., 1966), а органический фосфор — методом гидролиза по Б. А. Скопинцеву (Скопинцев и др., 1963).

Известно, что основное количество биогенных веществ поступает в водохранилище с водосборной площади рек Волги и Камы. В водохранилище они подвергаются сложным процессам превращения. Значительная часть их выносится в нижний бьеф, а остальная остается в водохранилище. В разные годы и сезоны в Куйбышевское водохранилище поступает с основными притоками и выносится в нижний бьеф различное количество биогенных веществ. Это зависит от водного стока и других факторов.

Рассматриваемые годы отличались по водному режиму. Самым многоводным был 1966 год с обильным поступлением вод Волги и Камы (276 км³) и высоким сбросом их в нижний бьеф (220 км³). Самый маловодный в десятилетнем ряду 1967 год характеризовался сравнительно малым поступлением вод (161 км³) и низким сбросом в нижний бьеф (168 км³). Средний по водности 1968 год отличался относительно высоким поступлением воды

и примерно равнозначным расходом при сработке водохранилища в течение года.

Повышенный водный сток в 1966, 1968 гг., обусловленный в основном весенним паводком, благоприятно сказался на содержании и величине поступления биогенных веществ в водохранилище и их выносе в нижний бьеф. В эти годы концентрация биогенных веществ, главным образом минеральных форм — общего железа, фосфатов, кремния, нитратов, оказалась заметно выше, чем в маловодном 1967 г. Наиболее четко эти изменения проявились в верхних створах (табл. 1).

Заметное возрастание весенней и годовой концентрации кремния, фосфора и нитратов в 1968 г. (с превышением примерно в 1.5 раза) по сравнению с 1967 г. объясняется не только поступлением их с паводковыми водами. 1968 г. отличался от других лет особыми гидрометеорологическими условиями — кратковременным, но высоким паводком, ветреной погодой, низкой летней температурой воды, что обусловило повышенное поступление биогенных веществ весной, вынос их с придонных горизонтов при ветровом перемешивании летом и снижение интенсивности развития фитопланктона. Возможно, что повышение содержания биогенных веществ произошло за счет заливания поймы рек притоков, осушенной в предыдущем 1967 г.

Исключение составил общий азот, среднегодовая концентрация которого в воде основных притоков оказалась выше (в Волге — 1.86 мг/л, в Каме — 1.93 мг/л) в маловодном году по сравнению с многоводным и средневодным годами (1.6—1.7 мг/л). Увеличение азота, главным образом минерального, в 1967 г. произошло, по-видимому, за счет изменения интенсивности биологических процессов.

Следует указать на неоднородность содержания биогенных веществ в воде притоков. В камских водах концентрация биогенных веществ (главным образом нитратов, железа, кремния и органического фосфора) больше, чем в волжских. В волжских водах, наоборот, повышено содержание фосфатов и в некоторые годы аммонийного азота, что следует учитывать при изучении водных масс, поступающих в водохранилище. Эти различия обусловлены структурой водосборных площадей Волги и Камы.

В верхних створах водохранилища наблюдается значительное увеличение концентрации биогенных веществ в конце зимы и начале весны (март—апрель) за счет повышенного поступления их с паводковыми водами. В период спада воды и усиливающегося развития водорослей в июне—июле содержание биогенных элементов снижается до минимума. В период отмирания водорослей (август—октябрь) концентрация биогенных веществ вновь возрастает, иногда до величин, превышающих их концентрацию во время паводка (органические формы азота и фосфор, реже нитраты и фосфаты). Наиболее заметны эти изменения в год с малой водностью (1967 г.).

Концентрация биогенных веществ в водах, сбрасываемых в нижний бьеф, отличается от концентрации их в водах, поступающих из Волги и Камы. Эти различия особенно характерны для минеральных форм — соединений азота, общего железа, кремния, содержание которых в верхних створах увеличивается за счет паводкового стока (табл. 1).

На формирование биогенных веществ в нижнем бьефе значительное влияние оказывают различные внутриводоемные процессы (седиментация, минерализация, фотосинтез и др.), в результате которых в режиме биогенных веществ этого участка происходят не только количественные, но и качественные изменения. При этом в воде, сбрасываемой из водохранилища в нижний бьеф, наряду со снижением содержания минеральных форм, главным образом азота и железа примерно в 1.5—2 раза, возрастает содержание органических соединений азота и фосфора. В результате такого

Содержание биогенных веществ в створах Волги (Чебоксары), Камы (Соколы Горы) и в нижнем бьефе Волжской ГЭС им. В. И. Ленина в 1966—1968 гг. (в мг/л)

Сезон	Участок	Азот					Фосфор			Железо	Кремний
		нитрат- ный	нитрит- ный	аммоний- ный	суммар- ный	органиче- ский	общий	минераль- ный	органиче- ский		
1966 г.											
Весна (IV—V)	Волга	0.34—	0.011—	0.73—	1.08—	0.96—	2.04—	0.062—	0.026—	0.088—	2.1—3.2
	Кама	0.11	0.045	0.10	0.26	1.19	1.45	0.038	0.041	0.079	0.28
	Нижний бьеф	0.67—	0.057—	0.43—	1.16—	1.03—	2.19—	0.033—	0.065—	0.098—	0.34—
Лето (VI—VIII)	Волга	0.11	0.013	0.12	0.24	1.33	1.57	0.033	0.026	0.059	0.39
	Кама	0.22—	0.012—	0.38—	0.61—	1.21—	1.82—	0.048—	0.035—	0.083—	0.70—
	Нижний бьеф	0.67	0.013	0.15	0.83	1.34	2.17	0.040	0.038	0.075	0.31
Осень (IX—XI)	Волга	0.20	0.042	0.09	0.33	1.14	1.47	0.026	0.040	0.066	0.05
	Кама	0.13	0.053	0.10	0.28	1.18	1.46	0.014	0.046	0.060	0.05
	Нижний бьеф	0.19	0.010	0.11	0.31	1.22	1.53	0.022	0.045	0.068	0.04
Зима (XII—III)	Волга	0.38	0.021	0.07	0.47	1.03	1.50	0.035	0.049	0.084	0.03
	Кама	0.28	0.006	0.12	0.40	1.11	1.51	0.017	0.025	0.042	0.05
	Нижний бьеф	0.22	0.003	0.11	0.33	1.66	1.99	0.036	0.046	0.082	0.03
Среднее за год	Волга	0.52	0.019	0.23	0.77	0.98	1.75	0.032	0.020	0.052	0.07
	Кама	0.64	0.025	0.28	0.94	0.98	1.92	0.032	0.035	0.065	0.09
	Нижний бьеф	0.36	0.030	0.22	0.61	1.09	1.76	0.036	0.040	0.076	0.11
	Волга	0.35	0.030	0.174	0.55	1.07	1.62	0.034	0.035	0.069	0.07
	Кама	0.36	0.030	0.22	0.61	1.09	1.71	0.022	0.036	0.058	0.11
	Нижний бьеф	0.26	0.013	0.149	0.424	1.34	1.77	0.035	0.042	0.077	0.05
1967 г.											
Весна (IV—V)	Волга	0.34—	0.009—	1.2—	1.55—	1.28—	2.83—	0.028—	0.017—	0.045—	3.3—3.0
	Кама	0.11	0.024	0.15	0.29	0.94	1.23	0.015	0.034	0.049	0.04
	Нижний бьеф	0.67—	0.005—	0.70—	1.37—	1.30—	2.67—	0.022—	0.036—	0.058—	0.13—
Лето (VI—VIII)	Волга	0.39	0.009	0.28	0.67	1.22	1.89	0.040	0.046	0.086	0.12
	Кама	0.34—	0.010—	0.34—	0.69—	1.13—	1.82—	0.033—	0.031—	0.064—	0.040—
	Нижний бьеф	0.45	0.005	0.48	0.93	1.32	2.25	0.020	0.048	0.070	0.060
	Волга	0.34	0.004	0.06	0.40	1.17	1.57	0.030	0.034	0.064	0.02
	Кама	0.32	0.006	0.05	0.37	1.18	1.55	0.021	0.025	0.046	0.06
	Нижний бьеф	0.23	0.011	0.08	0.32	1.42	1.70	0.010	0.074	0.086	0.07

Таблица 1 (продолжение)

Сезон	Участок	Азот					Фосфор			Железо	Кремний	
		нитрат- ный	нитрит- ный	аммоний- ный	суммар- ный	органиче- ский	общий	минераль- ный	органиче- ский			общий
Осень (IX—XI)	Волга	0.33	0.002	0.08	0.41	1.26	1.79	0.031	0.069	0.100	0.03	1.6
	Кама	0.59	0.002	0.07	0.67	1.39	2.06	0.015	0.037	0.052	0.04	1.8
	Нижний бьеф	0.38	0.002	0.06	0.44	1.50	1.94	0.040	0.058	0.098	0.02	1.3
	Волга	0.45	0.062	0.45	0.96	1.14	2.10	0.032	0.025	0.057	0.06	3.2
	Кама	0.43	0.021	0.60	1.05	1.00	2.05	0.023	0.028	0.051	0.04	2.9
Зима (XII—III)	Нижний бьеф	0.15	0.022	0.28	0.45	1.07	1.52	0.020	0.042	0.062	0.05	3.0
	Волга	0.38	0.024	0.29	0.70	1.15	1.86	0.027	0.045	0.072	0.05	2.5
Среднее за год	Кама	0.47	0.007	0.27	0.75	1.18	1.93	0.020	0.032	0.053	0.06	2.7
	Нижний бьеф	0.29	0.011	0.18	0.48	1.30	1.78	0.023	0.053	0.077	0.05	2.3
1968 г.												
Весна (IV—V)	Волга	0.63—	0.015—	0.15—	0.99—	1.45—	2.44—	0.028—	0.026—	0.054—	0.15—	1.6—2.6
	Кама	0.90	0.003	0.06	0.96	1.45	2.41	0.055	0.071	0.126	0.12	4.1—4.4
	Нижний бьеф	0.90—	0.002—	0.20—	1.1—	1.05—	2.15—	0.037—	0.027—	0.064—	0.20—	1.4—3.2
Лето (VI—VIII)	Волга	0.85	0.022	0.06	0.91	1.16	2.05—	0.024—	0.044—	0.068—	0.07—	2.2
	Кама	0.74	0.005	0.06	0.81	1.03	1.85	0.038	0.060	0.100	0.01	2.7
	Нижний бьеф	0.45	0.011	0.05	0.51	1.12	1.63	0.012	0.106	0.118	0.17	3.3
Осень (IX—XI)	Волга	0.34	0.017	0.04	0.39	1.02	1.42	0.032	0.054	0.086	0.09	3.8
	Кама	0.22	0.004	0.05	0.27	1.01	1.29	0.043	0.044	0.087	0.04	3.2
	Нижний бьеф	0.22	0.009	0.05	0.28	1.08	1.36	0.012	0.039	0.051	0.05	3.2
Зима (XII—III)	Волга	0.22	0.016	0.05	0.29	1.25	1.54	0.046	0.043	0.089	0.03	2.4
	Кама	0.52	0.007	0.14	0.54	1.06	1.72	0.026	0.036	0.062	0.04	4.2
	Нижний бьеф	0.67	0.021	0.11	0.80	1.00	1.80	0.009	0.038	0.047	0.06	2.3
Среднее за год	Волга	0.39	0.006	0.14	0.54	1.05	1.59	0.026	0.037	0.063	0.04	2.9
	Кама	0.54	0.005	0.09	0.63	1.11	1.71	0.035	0.048	0.082	0.09	3.5
	Нижний бьеф	0.52	0.012	0.08	0.61	1.08	1.69	0.015	0.060	0.074	0.12	2.9
Среднее за год	Волга	0.36	0.018	0.10	0.48	1.11	1.59	0.035	0.045	0.080	0.06	2.9

С*

Примечание. Данные для весны приведены в пределах колебаний, а для остальных сезонов указаны средние величины.

перераспределения отдельных форм биогенных веществ увеличиваются расходные величины баланса этих веществ по сравнению с тем, что наблюдалось в воде Волги и Камы.

Таким образом, концентрация биогенных веществ, поступающих с водами Волги и Камы, повышена по сравнению с концентрацией их в водах, сбрасываемых в нижний бьеф. На верхних створах содержание биогенных элементов увеличивается в основном за счет минеральных форм, приносимых с водой паводка. В нижнем бьефе наряду со снижением количества минеральных соединений происходит увеличение органических форм азота и фосфора.

На основании химических определений и данных о расходе воды по створам и у плотины были рассчитаны абсолютные величины содержания элементов.¹ Данные по расходам воды взяты из отчетов Комсомольской гидрометеорологической обсерватории. Полученные по отдельным годам и сезонам результаты (табл. 2, 3; рис. 1, 2) позволяют сделать следующие обобщения.

1. Поступление биогенных веществ в водохранилище и их вынос изменяются в зависимости от водности года. В многоводный и средневодный годы (1966 и 1968 гг.) величины азота, фосфора и кремния в 1.5—2 раза выше, чем в маловодном 1967 г., что соответствует соотношениям водных объемов указанных лет (примерно 2 : 1). Поступление и вынос общего железа в 1966 и 1968 гг. увеличились в 2.5—5 раз по сравнению с 1967 г.

Поступление основной массы биогенных веществ приходится на период половодья: в многоводный год 50—60 %, в маловодный — 30—40 %, от годового. Исключение представляет общее количество железа (1966 г.) и кремния (1967 г.), относительные величины которых весной были выше и составили 70—80 % от годового поступления.

2. С водой стока в нижний бьеф вносится меньше биогенных веществ, чем поступает в водохранилище, за счет уменьшения водного стока, осаждения, потребления и др. Разница между поступлением и выносом биогенных веществ выражается следующими величинами: общий азот — 4—16 %, общий фосфор — 8—13 % от годового, что несколько ниже аккумуляции воды (4—20 %). Значительно более высокой оказалась аккумуляция кремния (до 30 %) и железа (до 44 %) — это заметно выше аккумуляции воды.

Аккумуляция биогенных веществ в весенний период (общего азота и фосфора — 53—58 % от годового поступления в многоводный год и 20—34 % — в маловодный) соответствует аккумуляции воды. В остальные сезоны аккумуляция веществ обычно превышает аккумуляцию воды.

Повышенная аккумуляция железа, кремния и минеральных форм азота наблюдалась также и в других водохранилищах — Цимлянском (Фесенко, Рогожкин, 1960), Каховском (Денисова, 1967), Троицком (Кривопалова, 1969) и др.

3. В 1967 и 1968 гг. сток биогенных веществ в нижнем бьефе превышал их поступление с речными водами: органических форм азота — на 14 %, фосфора — на 47 и минерального фосфора — на 36 % от годового поступления. Это свидетельствует об интенсивном пополнении водохранилища указанными веществами за счет биологических процессов в водоеме.

4. Поступление биогенных веществ с водами притоков неодинаково: в волжских водах преобладают минеральные формы азота и фосфора, в камских — органические формы азота и фосфора, общее железо, кремний.

¹ Боковая приточность рек, впадающих в Куйбышевское водохранилище, нами не учитывалась. Величина ее в меженный период не превышает 3—5 % от общей величины поступающих вод. В период паводка она увеличивается (иногда до 20 %).

Элементы баланса азота, фосфора, железа и кремния (тыс. т) и водный сток (км³) Куйбышевского водохранилища по сезонам

Показатель	Весна (IV—V)			Лето (VI—VIII)			Осень (IX—XI)			Зима (XII—III)		
	1966 г.	1967 г.	1968 г.	1966 г.	1967 г.	1968 г.	1966 г.	1967 г.	1968 г.	1966 г.	1967 г.	1968 г.
Вода												
Поступление	146.0	64.8	93.0	43.7	34.1	52.8	34.8	28.0	33.5	41.9	36.7	40.3
Сток	61.0	43.6	86.2	49.9	35.1	46.3	34.8	34.0	41.1	60.2	56.4	49.6
Аккумуляция	85.0	21.2	6.8	-6.2	-1.0	6.5	0.0	-6.0	-7.6	-18.3	-19.7	-9.3
	58	32	7	14	2	12	0.0	21	22	43	53	23
Азот общий												
Поступление	262.0	139.8	217.7	65.4	53.1	94.1	52.5	53.1	44.0	77.3	76.5	71.1
Сток	122.8	91.0	178.6	80.5	61.3	65.7	69.5	65.6	62.5	102.5	91.8	79.4
Аккумуляция	139.2	48.3	39.1	-15.1	-8.2	28.4	-16.9	-12.5	-18.5	-25.2	-15.3	-8.3
	53	34	18	23	15	30	32	23	42	32	19.7	12
Фосфор общий												
Поступление	11.6	3.7	8.4	2.8	2.4	5.9	2.2	2.2	2.4	2.3	2.0	2.3
Сток	4.9	2.9	6.6	3.5	3.1	4.0	2.8	3.2	3.7	4.8	3.5	3.1
Аккумуляция	6.7	0.8	1.8	-0.7	-0.7	1.9	-0.6	-1.0	-1.3	-2.5	-1.5	-0.8
	57	21	21	20	29	33	27	45	54	11	75	34
Железо												
Поступление	38.7	5.3	20.9	2.4	1.4	8.9	1.5	1.0	1.5	3.4	1.8	3.2
Сток	30.0	2.3	11.0	2.3	2.5	4.5	0.8	0.7	1.5	6.6	2.2	2.0
Аккумуляция	8.7	3.0	9.9	0.01	-1.1	4.3	0.7	0.3	0	-3.2	-0.4	1.2
	22	56	47	0.4	78	49	47	33	0	94	23	38
Кремний												
Поступление	418.2	304.3	297.3	95.8	70.4	140.9	70.2	48.5	120.3	126.7	114.1	143.0
Сток	113.5	138.0	233.3	129.8	113.1	153.4	69.5	43.1	133.2	170.7	125.3	111.8
Аккумуляция	304.7	66.3	64.1	-33.9	-42.7	-12.4	0.7	5.4	-13.1	-44.0	11.2	31.1
	72	32	21	35	58	85	1	11	10	35	10	32

Примечание. В знаменателе — % к годовой величине поступления.

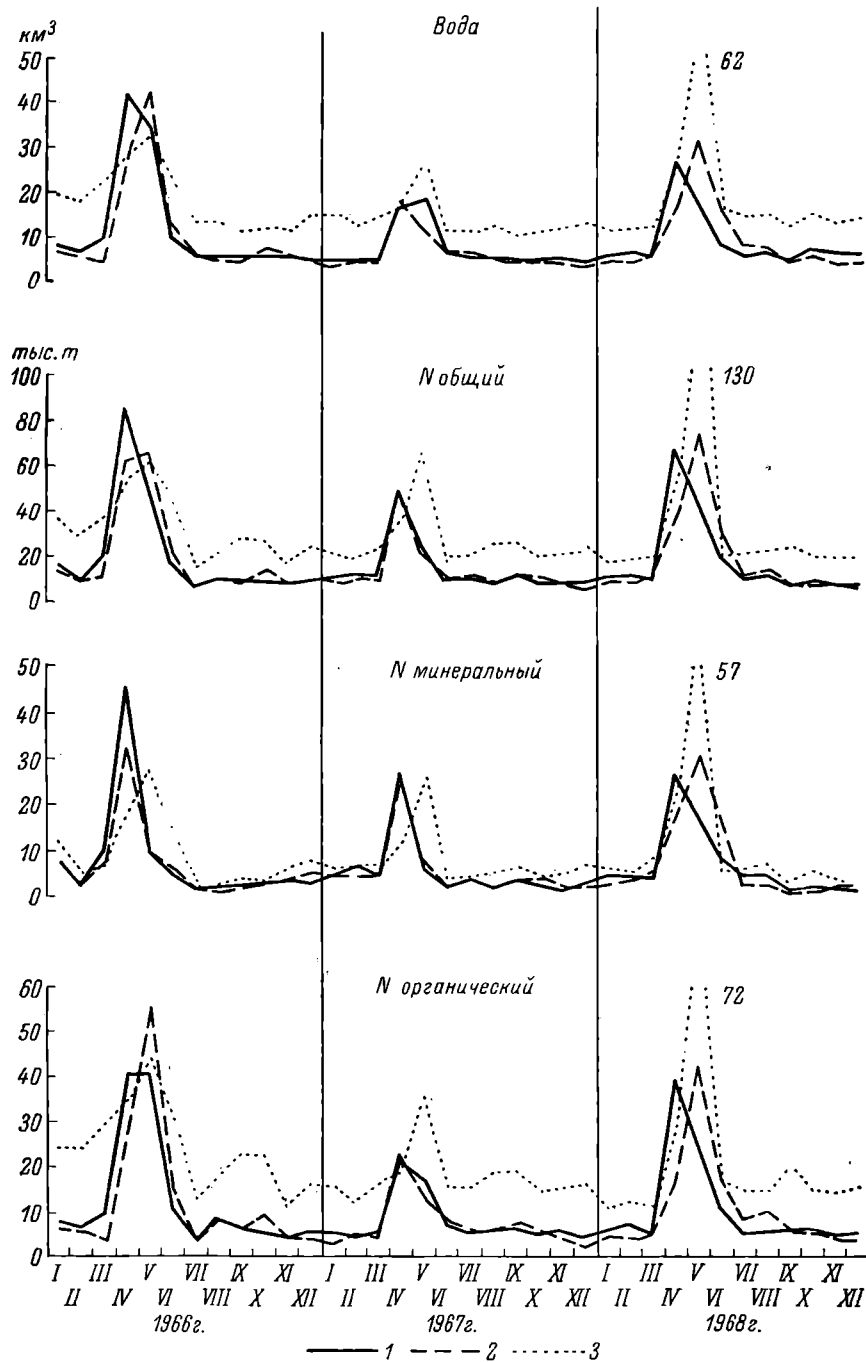


Рис. 1. Колебания годовых величин поступления и стока воды и соединений азота в Куйбышевском водохранилище в 1966—1968 гг.

1 — Волга у г. Чебоксар; 2 — Кама у сел. Соколы Горы; 3 — нижний бьеф Волжской ГЭС им. В. И. Ленина.

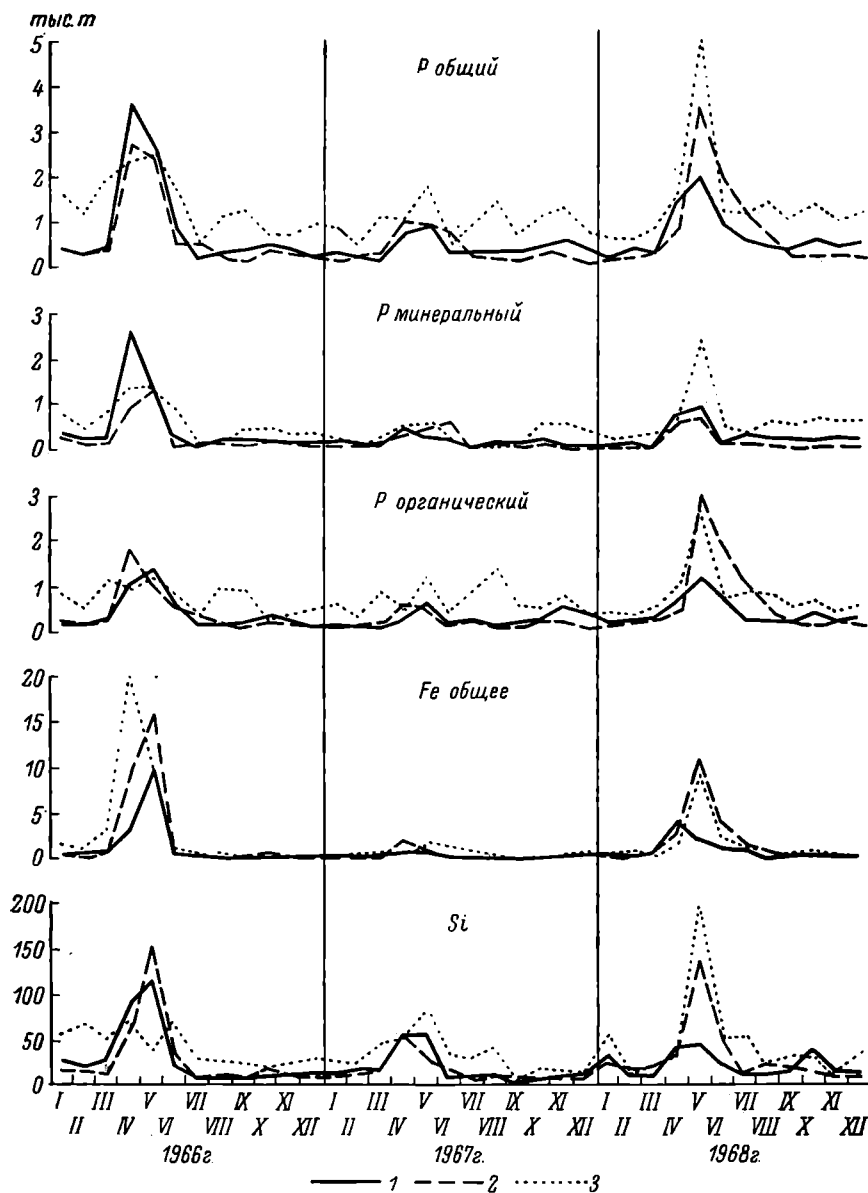


Рис. 2. Колебания годовых величин поступления и стока соединений фосфора, общего железа и кремния.

Обозначения те же, что на рис. 1.

Т а б л и ц а 3
Элементы баланса биогенных веществ (тыс. т) и воды (км³) в Куйбышевском водохранилище (1966—1968 гг.)

Ингредиент	Поступление в водохранилище						Сток в створе ГЭС			Аккумуляция ¹		
	1966 г.		1967 г.		1968 г.		1966 г.	1967 г.	1968 г.	1966 г.	1967 г.	1968 г.
	Волга Кама	сумма	Волга Кама	сумма	Волга Кама	сумма						
Азот:												
нитратный	44.0 46.1	90.1	27.8 37.2	65.0	69.0 76.4	145.4	67.7	50.7	105.0	22.4 25.0	14.3 22	40.4 25
нитритный	3.8 4.2	8.0	1.8 0.4	2.2	0.8 1.2	2.0	3.1	1.9	4.9	4.9 6.1	0.3 14	2.9 14
аммонийный	44.2 29.2	73.4	33.6 25.2	58.8	10.5 9.9	20.4	35.9	35.9	22.7	37.5 51	22.9 39	-2.3 11
Сумма	92.0 79.5	171.5	63.2 62.8	126.0	80.3 87.5	167.8	106.7	88.5	132.6	64.8 38	37.5 30	35.2 24
органический	151.0 153.2	304.2	97.4 92.4	189.8	129.5 130.6	260.1	291.6	215.6	249.7	12.6 4	-25.8 14	10.4 4
Фосфор:												
общий	243.0 232.8	475.8	160.7 155.3	316.0	209.8 218.1	427.9	398.3	304.1	382.3	77.5 16	11.9 4	45.5 11
минеральный	6.0 3.5	9.4	2.2 2.2	4.3	3.8 2.1	5.9	7.9	3.9	7.9	1.5 16	0.4 9	-2.0 36
органический	4.8 5.2	10.0	3.3 2.6	5.9	5.1 8.3	13.4	9.1	8.7	9.9	0.8 8	-2.8 47	3.5 26
общий	10.8 8.7	19.5	5.5 4.7	10.2	9 10.4	19.3	17.0	12.6	17.8	2.5 13	-2.4 23	-1.5 8
Железо общее	16.6 29.7	46.3	3.8 6.0	9.8	11.6 22.7	34.3	40.1	7.9	18.9	6.2 13	1.9 19	15.4 44
Кремний	358.6 377.3	735.9	226.6 207.5	434.1	280.4 425.8	706.2	512.7	407.4	650.9	223.2 30	26.7 6	55.3 7
Вода	142.4 133.6	276.0	85.2 76.2	161.4	107.9 114.9	222.9	220.4	167.8	223.8	55.5 20	-6.4 4	-1.1 0.5

¹ В знаменателе — % к годовой величине поступления.

5. Условия высокого водообмена и значительной сработки уровня в Куйбышевском водохранилище мало способствуют аккумуляции биогенных веществ.

ЛИТЕРАТУРА

- А л е к и н О. А. 1954. Химический анализ вод суши. Л.
- Б а р с у к о в а Л. А. 1965. Биогенный сток Волги в первые годы зарегулирования стока у Волгограда. Тр. КаспНИРО, т. 20, М.
- Б а р с у к о в а Л. А. 1967. Биогенный сток р. Волги в 1963—1964 гг. Тр. КаспНИРО, т. 23, М.
- Г у с е в а Н. Н. 1961. Изменение химизма воды Волги в связи с сооружением Волжской ГЭС им. В. И. Ленина. Научно-практ. конф. по санитарн. охране водных источников от загрязнения. Куйбышев.
- Г у с е в а Н. Н. 1966. О химизме воды Волги в нижнем бьефе Волжской ГЭС им. В. И. Ленина. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 13 (16).
- Г у с е в а Н. Н. 1968. Изменения в содержании биогенных веществ Куйбышевского водохранилища в период его становления. Первая конф. по изуч. водоемов бассейна Волги. Тольятти.
- Г у с е в а Н. Н., Е. А. А н и с и м о в а. 1971. Сток соединений азота и фосфора р. Волги в створе Волжской ГЭС им. В. И. Ленина. Информ. бюлл. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, № 9.
- Д е н и с о в а А. И. 1967. Ионно-солевой и биогенный баланс водохранилищ Днепра. В кн.: Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. Л.
- Д ы ш к о Т. В. 1953. Применение микрометода Кьельдаля к определению органического азота в природных водах. Гидрохим. матер., т. 20.
- З е н и н А. А., В. В. К и р ю ш к и н а и Г. М. М о р о з о в а. 1964. Сток растворенных веществ р. Волги в Каспийское море. Гидрохим. матер., т. 38.
- З е н и н А. А., А. В. П р о ц е н к о. 1961. Сток растворенных веществ р. Волги в Каспийское море. Гидрохим. матер., т. 34.
- К р и в о п а л о в а З. Ф. 1969. Аккумуляция биогенных элементов и органического вещества Троицким водохранилищем. Матер. к совещ. по прогнозиров. содерж. органич. вещ. и биогенных элементов в водохранилищах, Рыбинск.
- П а ш а н о в а А. П., А. Д. С е м е н о в, Л. И. Н е м ц о в а, И. Н. Б о л т е н к о в а. 1966. Использование диффузионного метода при определении азота в природных водах. Гидрохим. матер., т. 11.
- С к о п и н ц е в Б. А., А. В. К а р п о в и С. Н. Т и м о ф е е в а. 1963. Опыт применения автоклава для минерализации органических веществ природных вод. Гидрохим. матер., т. 35.
- Ф е с е н к о Н. Г., В. И. Р о г о ж к и н. 1960. Аккумуляция соединений фосфора и азота Цимлянским водохранилищем за 1954—1967 гг. и изменение их стока в створе гидроузла. Гидрохим. матер., т. 30.
-

НАУЧНЫЕ ОБОСНОВАНИЯ К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ СОДЕРЖАНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Для прогнозирования качества воды проектируемых и изменений свойств воды существующих водохранилищ применяются два способа. Первый может быть назван методом аналогов, второй — расчетным. Необходимо сразу же указать, что при прогнозировании по аналогии почти всегда прибегают к расчетам, обычно в простейшем виде. Однако и при расчетном методе из-за отсутствия или недостатка информации нередко возникает необходимость в сопоставлении с близкими по типу водоемами.

МЕТОД АНАЛОГОВ

При первом способе обычно прибегают к помощи специалистов-экспертов, поэтому он может быть назван также методом экспертных решений. В качестве аналогов служат водохранилища, озера и крупные пруды. В случае отсутствия водоемов-аналогов с замедленным стоком суждения основываются на качестве воды источников, питающих водохранилища. Несмотря на недостаточность материалов, предположения о качестве воды системы канала им. Москвы, сделанные около 40 лет назад С. А. Озеровым, С. Н. Строгановым и др., в общем оправдались довольно близко (Драчев и Кононов, 1937). В настоящее время прогнозирование по аналогии значительно облегчается тем, что во всех климатических зонах Советского Союза от Заполярья до крайнего юга построены и в течение ряда лет эксплуатируются водохранилища различного объема, типа и назначения (Баранов, 1961). В качестве примера такого рода прогнозов можно указать на работу П. П. Воронкова (1951) по водохранилищам волжской системы, П. В. Остапени (1959) по водохранилищам, проектировавшимся в Полесье, и И. С. Трифиновой (1969) по водохранилищу на р. Сулак. В большинстве случаев прогнозы по аналогии можно делать уверенно и получать хорошие схождения, достаточные для многих практических целей. Для облегчения подбора водоемов-аналогов Ф. И. Безлер (1968) предложил перфорированные карточки, на одной стороне которых дана характеристика условий формирования водохранилищ, а на другой — признаки и свойства воды в них.

Вместе с тем при прогнозировании свойств воды, связанных с превращением органического вещества и развитием гидробионтов, применение метода аналогов может привести к серьезным ошибкам. Так, на канале Донец—Донбасс и первой очереди Каракумского канала, а также на водопроводном канале восточной станции московского водопровода в про-

пессе эксплуатации возникли непредвиденные биологические помехи для водоснабжения. Значительно ниже предполагаемой оказалась рыбопродукция водохранилищ волжского каскада.

При прогнозировании содержания органического вещества и биогенных элементов по методу аналогов трудно оценить значимость отдельных факторов и определить пределы возможных отклонений. Вероятность и величина отклонений могут быть определены в тех случаях, когда имеется возможность составить баланс прогнозируемого вещества.

РАСЧЕТНЫЙ МЕТОД

Для составления баланса необходимо знать в количественном выражении поступление и расход исследуемого вещества в водоеме. Уравнение баланса водной массы включает большое количество членов переменного значения (Бочков, 1941; Временные указания. . ., 1957; Кожара, 1969). Для количественной оценки статей прихода и расхода обычно не имеется полной информации. Сложность прогнозирования увеличивается в связи с необходимостью иметь не только количественную характеристику, но и учитывать изменения данного элемента на период прогнозирования.

Для ингредиентов солевого состава существует несколько приемов расчета содержания данного элемента в водоеме — как в среднем по водоему, так и в отдельных его частях. Сравнение и приложимость имеющихся приемов прогнозирования солевого состава приведены в работах А. И. Денисовой и А. М. Алмазова (1961), М. И. Кривенцова с соавторами (1964) и М. Н. Тарасова, И. М. Павелко (1969). Во всех предложенных формулах и расчетах не учитывается влияние гидробионтов. На необходимость учета последнего фактора при расчетах солевого состава указал Г. И. Долгов (1962).

Внутриводоемные процессы — обмен между дном и водой, усвоение элементов растительными организмами, прижизненное выделение органических и минеральных соединений, а также деструкция после отмирания — являются решающими факторами содержания и превращения биогенных элементов и органического вещества. Таким образом, прогнозирование последних представляется задачей значительно более сложной, чем в отношении общего минерального состава и его отдельных ингредиентов.

При современном уровне знаний расчетный метод прогнозирования биогенных элементов может дать указание лишь на уровень трофности проектируемого водоема и на изменения режима биогенных элементов существующих водохранилищ. Для этого необходимо иметь ряд исходных данных о содержании и формах того или иного соединения и представление об основных этапах превращения рассматриваемого вещества в водоеме.

Исходным пунктом для суждения о содержании биогенных элементов и органического вещества служит состав вод, поступающих в водохранилища. Равнинные водохранилища обычно заполняются во время весеннего половодья. Для водоемов большого объема и малой проточности внешние воды имеют преобладающее значение. В водохранилищах сезонного регулирования воды летней и зимней межени в некоторые сезоны могут полностью вытеснить внешние воды. В различных физико-географических условиях состав вод весеннего половодья менее варьирует, чем меженный сток. К сожалению, состав растворенных солей, содержание взвесей и особенно количество и формы органического вещества и биогенных элементов в воде рек в период весеннего половодья изучены слабо. В общем годовом стоке равнинных рек в пределах СССР внешние воды составляют 60—80%. Количество анализов, относящихся к периоду весеннего половодья —

не более 10—15% от общего числа анализов, характеризующих годовой сток.

Как исходное содержание, так и ход превращений биогенных веществ зависят от местных условий: климата, характера площади водосбора, почв, растительности, плотности населения и уровня развития промышленности. Своеобразные особенности питания и круговорота веществ имеют водохранилища лесной, степной и пустынной зон, а также горные водохранилища Кавказа и Средней Азии. В целях прогнозирования необходим сбор данных по основным физико-географическим зонам. Ниже приводятся некоторые характерные черты водохранилищ лесной зоны.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ВОДОЕМОВ ЛЕСНОЙ ЗОНЫ

Биогенные элементы

Для лесной зоны, совпадающей с границами распространения оподзоленных почв, содержание биогенных элементов в водах весеннего половодья выражается следующими величинами: азот общий — 0.7—1.5 мг/л, фосфор общий — 0.1—0.2, калий — 0.5—1.5 мг/л. Более $\frac{1}{3}$ азота находится в виде аммония, нитратов и нитритов, около $\frac{1}{3}$ фосфора — в минеральной форме. Калий почти весь в ионном состоянии. Соответствующие величины для меженных вод равны: азот — 0.4—1.7 мг/л, фосфор — 0.02 мг/л. Содержание фосфатного фосфора составляет несколько микрограмм в литре, калия 1.5—2.5 мг/л. Из-за малого числа наблюдений концентрации общего азота и общего фосфора могут быть оценены приближенно. В отдельных случаях в зависимости от характера площади водосбора обнаруживаются значительные отклонения от приведенных величин.

Некоторая часть азота, фосфора и калия находится во взвеси, принимаемой в водохранилища из рек. Большая часть взвеси при попадании в зону замедленного течения выпадает при отстаивании на дно и непосредственно не влияет на содержание растворенного и общего фосфора в воде. Тем не менее содержание фосфора в донных отложениях сказывается на интенсивности обмена соединений фосфора между дном и прилегающими слоями воды.

Содержание биогенных элементов в метеорных водах составляет: азот общий — 0.60 мг/л, нитратный — 0.30 и аммонийный — 0.20 мг/л. Концентрация фосфора в метеорных водах и снеговом покрове равна 25 мкг/л по общему фосфору и 15 мкг/л — по фосфатному, калия — 0.1—0.2 мг/л.

Мало изучен вопрос об оседании биогенных элементов на дно водохранилищ и обратном их поступлении в воду. По данным для Клязьминского водохранилища, в глубоководной части его (8—10 м) ежегодно оседало на 1 м² дна 4.5 кг сухого вещества с содержанием в нем органического вещества 400—500 г, фосфора общего — 4.5, азота — 20—30 г (Драчев, 1969).

Судя по составу минеральной части донных отложений, основная масса их образуется вследствие размыва почвенного покрова и трансседиментаций взвеси в глубоководных частях водоема. Остается невыясненным вопрос о количестве азота, фосфора и калия, поступающих в толщу воды из донных отложений. Значение этого явления усиливается при ветровых волнениях, вызывающих взмучивание донных отложений. Судя по опытам с обработкой навески ила возрастающими количествами воды, в раствор может переходить небольшое количество фосфора (несколько процентов от общего его содержания в иле). Почти нет данных о количестве азота, теряющегося при денитрификации в водной толще и донных

отложениях. Имеются лишь разрозненные и единичные сведения и предположения о количестве азота, связываемого бактериями и водорослями (Трифенова Н. А., 1969).

Некоторая часть биогенных элементов поступает в воду в процессе непрерывного обмена между гидробионтами и водной средой. Количество азота и фосфора, выделяемого в процессе жизнедеятельности гидробионтов, можно приближенно установить по скорости поглощения меченого азота и фосфора. Полученные данные свидетельствуют о значительной вариабельности скорости поступления и времени оборота фосфатного фосфора (Былинкина, 1969).

Существенное и все возрастающее значение в качестве источника поступления биогенных элементов приобретают сбросы бытовых и промышленных стоков. Проведенные исследования и расчеты показали, что со сточными водами городской канализации в расчете на 1 жителя поступает 7—8 г азота, 0,7—0,8 фосфора и 2,5 г калия в сутки (Драчев, 1968). Для расчетов увеличения поступления биогенных элементов в будущем может быть принято удвоение числа жителей больших городов за период 25 лет. Для установления масштабов поступления биогенных веществ с промышленными сточными водами данных явно недостаточно. Большое количество связанного азота поступает со сточными водами пищевой промышленности и ряда химических предприятий. Много калия обнаружено в стоках некоторых нефтеперегонных заводов (Кобякова, 1968). Количество фосфора в стоках металлургического завода г. Череповца почти равно сбросам канализации города с населением в 200 тыс. человек (Былинкина, Петухова, 1969). Данные о содержании некоторых биогенных элементов и органического вещества в промышленных сточных водах имеются в сборниках «Производственные сточные воды» (1948, 1950, 1952, 1954, 1960).

Органическое вещество

По данным Л. П. Крыловой и Б. А. Скопинцева (1959), количество органического углерода в отдельных реках в период половодья колебалось в пределах 7,2—17,1 мг/л, органического азота — 0,59—0,78 мг/л (Дышко, Скопинцев, 1969). Содержание органического вещества в водных стоках рек с озерно-болотным питанием по перманганатной окисляемости может быть принято равным 15—20 мг О/л. Весенний поверхностный сток рек, площадь водосбора которых покрыта оподзоленными почвами, имеет окисляемость 5—7 мг О/л, величина биохимического потребления кислорода за 5 суток составляет 1—3 мг/л. В меженьный период величина окисляемости для рек и озер болотного питания может быть принята около 12 мг О/л, для рек подземного питания — 4—5 мг О/л.

Продукция органического вещества погруженной и прибрежной растительности водохранилищ колеблется в широких пределах — от 1,3 до 25 мг сухого вещества в пересчете на 1 л воды (Экзерцев, 1958; Белавская и Кутова, 1966).

Первичная продукция органического вещества фитопланктона, выраженная в кислороде, для водохранилищ Верхней Волги в вегетационный период составляет: для Ивановского водохранилища — 2,4 г/м² за сутки, для Рыбинского — 1,4 г/м² (Пырина, 1966).

По данным Ю. И. Сорокина (1958), среднесуточная продукция сухого органического вещества для Рыбинского водохранилища в целом за весь вегетационный период равна 0,54 г/м², в пересчете на 1 л — 0,11 мг. Суммарная продукция за вегетационный период составляет 100 г сухого органического вещества под 1 м² поверхности водоема, в пересчете на 1 л — 20,1 мг. В волжском плесе продукция органического вещества в несколько раз выше, чем в других частях водохранилища, что можно объяснить его

более высокой трофностью. В условиях евтрофных водоемов приведенные значения должны быть увеличены в 2—3 раза.

Для оценки скорости распада органического вещества могут быть приняты следующие величины констант биохимического окисления: для хозяйственно-бытовых сточных вод — 0.1, для фитопланктона — 0.07—0.09 (Скопинцев и Брук, 1940), для природного органического вещества — 0.02—0.06 (Скопинцев, 1949), для взвешенных веществ почвенного происхождения — 0.002—0.05. Указанные константы соответствуют скорости распада сравнительно легко окисляемой части органического вещества при температуре 20°. Для других температур должны быть введены соответствующие поправки.

Для характеристики форм органического вещества в водохранилищах данных недостаточно. Общей закономерностью является более быстрое снижение количества окрашенного органического вещества по сравнению со светлоокрашенным. Возможно, это происходит за счет некоторого увеличения слабо окрашенного органического вещества, образующегося при распаде фитопланктона. Второй причиной, возможно, является коагуляция высокомолекулярных окрашенных органических соединений и оседание их на дно. Приближенное сопоставление цветности воды, поступающей и выходящей из водохранилища, показывает, что средний годовой эффект отстоя в Рыбинском водохранилище выражается в уменьшении цветности на 50% при значительно меньшем снижении окисляемости (Драчев, 1956). В Учинском водохранилище при полугодовом отстое цветность уменьшалась с 58 до 33° (Францев, 1959).

В первые годы существования водохранилища на режим биогенных элементов и количество органического вещества оказывают влияние затопленная растительность и переработка берегов, сопровождаемая размывом почвенного покрова и подстилающих пород.

Содержание органического вещества растительных остатков может быть принято равным: для пахотных угодий — 0.15 кг на 1 м², для луговой растительности — 2.25 (Драчев и др., 1957), для лесных площадей — 40 кг (Куражковский, 1953). В аэробных условиях распад органического вещества остатков травянистой растительности и лесной подстилки можно охарактеризовать константой биохимического окисления 0.03. Скорость распада древесины варьирует в зависимости от лесных пород и возраста.

Кислородный режим

Ранней весной содержание кислорода во всей толще воды составляет 11—13 мг/л, в летнее время — 7—8, к концу осени оно достигает максимума (12—14) и к концу зимы вновь снижается до 7—8 мг/л. В водохранилищах озерного типа зимой и летом количество кислорода в слое ниже температурного скачка падает до 0—4 мг/л. В трофогенном слое летом содержание кислорода за счет процесса фотосинтеза может возрастать до 10—11 мг/л и более. В конце лета при установлении гомотермии количество кислорода во всей толще воды может снизиться до 3—4 мг/л. Дефицит его в этот период усиленно пополняется за счет атмосферной аэрации (Драчев, 1938).

В проточных водохранилищах в зимнее время кислородный режим определяется поступлением речных вод, в которых в подледный период содержание кислорода составляет примерно 1—2 мг/л. Таким образом, в зоне распространения вод грунтового происхождения создаются анаэробные условия, которые могут распространяться до плотины.

В целом для водохранилищ характерна недонасыщенность кислородом на 10—25% от полного насыщения. Причиной этого являются непрерывно идущие процессы окисления органических соединений (растворенных газов,

авто- и аллохтонного органического вещества). Наиболее интенсивны эти процессы летом в трофогенном слое и у дна, а зимой — в придонных слоях. Окислительная мощность водоема заметно превышает годовую продукцию органического вещества фитопланктона. Количество восстановленных продуктов, образующихся в затопленных почвах и донных отложениях в течение года, приближается к чистой продукции фитопланктона в эквивалентном выражении (Драчев, 1951; Вертебная, 1960). В зимнее время за счет донных процессов потребляется около 60% от общего потребления кислорода в подледных условиях.

Приведенные данные, касающиеся в основном водохранилищ Верхней Волги, нуждаются в дальнейшем пополнении. Особенно важное значение имеет изучение процессов обмена между гидробионтами и средой, между дном, водной массой и атмосферой.

ЛИТЕРАТУРА

- Баранов И. В. 1961. Опыт биогидрохимической классификации водохранилищ европейской части СССР. Изв. Гос. н.-иссл. инст. озern. и речн. рыбн. хоз., т. 50, Л.
- Безлер Ф. И. 1968. К методике прогнозирования содержания органических и биогенных веществ, газового режима и цветения водохранилищ. Информ. бюлл. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, № 2.
- Белавская А. П. и Т. Н. Кутова. 1966. Растительность зоны временного затопления Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 11 (14).
- Бочков Н. М. 1941. Методы прогноза минерализации воды в водохранилищах. В кн.: Водохранилища для водоснабжения промышленных предприятий и населенных мест. М.
- Былинкина А. А. 1969. О времени скорости и оборота минерального фосфора в поверхностных водах. Матер. к совещ. по прогнозиров. содерж. органич. вещ. и биогенных элементов в водохранилищах, Рыбинск.
- Былинкина А. А., Л. А. Петухова. 1969. Поступление соединений фосфора в Рыбинское водохранилище с местным стоком и сточными водами. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 19 (22).
- Вертебная П. И. 1960. Наблюдения над интенсивностью фотосинтеза и дыхания планктона Клязьминского водохранилища канала им. Москвы. Тр. Всесоюзн. гидробиол. общ., т. X.
- Воронков П. П. 1951. Основы расчета изменения минерализации воды водохранилищ волжской системы. Тр. Гос. гидрол. инст., вып. 33 (87).
- Временные указания по прогнозу качества воды при проектировании водохранилищ. 1957. Под ред. Е. В. Близняка. М.
- Денисова А. И. и А. М. Алмазов. 1961. Прогноз минерализации воды Каховского водохранилища и его оправдываемость. Гидрохим. матер., т. 32.
- Долгов Г. И. 1962. Об основных принципах и путях разработки методики прогноза качества воды водохранилищ. Гидрохим. матер., т. 33.
- Драчев С. М. 1938. Величина атмосферной реаэрации в Учинском водохранилище канала Москва—Волга. Водоснабж. и санитарн. техн., № 6.
- Драчев С. М. 1951. Клязьминское водохранилище как источник питьевого водоснабжения. Санитарная характеристика водоемов. Тр. Акад. мед. наук СССР, т. X.
- Драчев С. М. 1956. Водохранилища и каналы как источники хозяйственно-питьевого водоснабжения. М.
- Драчев С. М. 1968. Изменения химического состава и свойства воды р. Москвы в связи с загрязнением и процессами самоочищения. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 18 (24).
- Драчев С. М. 1969. Химический состав донных отложений и затопленных почв. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 19 (22).
- Драчев С. М. и В. Н. Кононов. 1937. О качестве воды Клязьминского и Долгопрудненского водохранилищ в системе канала Москва—Волга. Гигиена и санитария, № 5—6.
- Драчев С. М., Н. М. Кабанов, А. М. Сологуб. 1957. О влиянии затопленной растительности на качество воды. Бюлл. Моск. общ. испыт. природы, отд. биол., т. LXII, вып. 2.
- Дышко Т. В. и Б. А. Скопичев. 1959. Содержание органического азота в водах рек и озер Подмосковья и крупных рек Советского Союза. Гидрохим. матер., т. 28.
- Кобякова Н. А. 1968. Изменения катионов в воде р. Москвы под влиянием бытовых и промышленных загрязнений в зимний период. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 18 (24).

- К о ж а р а В. Л. 1969. Значение неоднородности водоема для гидрохимического прогнозирования. Матер. к совещ. по прогнозиров. содерж. органич. вещ. и биогенных элементов в водохранилищах, Рыбинск.
- К р и в е н ц о в М. И., М. В. П е т р е н к о, А. Н. Х о м е н к о. 1964. Сравнение точности основных методов прогноза солености воды водохранилищ. Гидрохим. матер., т. 37.
- К р ы л о в а Л. П. и Б. А. С к о п и н ц е в. 1959. Содержание органического углерода в водах рек и озер Подмоскovie и крупных рек Советского Союза. Гидрохим. матер., т. 28.
- К у р а ж к о в с к и й Л. Н. 1953. О затопленных лесах Рыбинского водохранилища. В кн.: Рыбинское водохранилище, ч. 1. Изд. МОИП.
- О с т а п е н я П. В. 1959. Прогноз гидрохимического и санитарного режима водохранилищ, проектируемых в БССР на территории Полесской низменности. Гидрохим. матер., т. 28.
- П р о и з в о д с т в е н н ы е сточные воды. 1948, 1950, 1952, 1954, 1960. Вып. 1—5. М.
- П ы р и н а И. Л. 1966. Первичная продукция фитопланктона в Ивановском, Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах в зависимости от некоторых факторов. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 13 (16).
- С к о п и н ц е в Б. А. 1949. О потреблении кислорода в природных водах стойкими органическими веществами. Гидрохим. матер., т. 16.
- С к о п и н ц е в Б. А. и Е. С. Б р у к. 1940. Исследование окислительных процессов, протекающих при распаде фитопланктона в аэробных условиях. Микробиол., т. 9, вып. 6.
- С о р о к и н Ю. И. 1958. Первичная продукция органического вещества в водной толще Рыбинского водохранилища. Тр. Биол. ст. «Борок», вып. 3.
- Т а р а с о в М. Н., И. М. П а в е л к о. 1969. Изменения гидрохимического режима рек при их зарегулировании водохранилищами и вопросы прогнозирования. Гидрохим. матер., т. 50.
- Т р и ф о н о в а И. С. 1969. Исследование фитопланктона водоемов бассейна р. Сулак и прогноз его развития в Черкейском водохранилище. Матер. к совещ. по прогнозиров. содерж. органич. вещ. и биогенных элементов в водохранилищах, Рыбинск.
- Т р и ф о н о в а Н. А. 1969. О накоплении соединений азота в Рыбинском водохранилище в вегетационный период. Матер. к совещ. по прогнозиров. содерж. органич. вещ. и биогенных элементов в водохранилищах, Рыбинск.
- Ф р а н ц е в А. В. 1959. Очистной эффект Учинского водохранилища и некоторые пути его повышения. Тр. VI совещ. по проблемам биол. внутр. вод, М.—Л.
- Э к з е р ц е в В. А. 1958. Продукция прибрежно-водной растительности Ивановского водохранилища. Бюлл. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, № 1.
-

О ВЛИЯНИИ ФИТОПЛАНКТОНА НА ПРОНИКНОВЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В ВОДУ ВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Степень развития фитопланктона и прозрачность водных масс являются важнейшими факторами, определяющими первичную продукцию водоемов. Чем глубже распространяется солнечная радиация и чем выше биомасса водорослей в освещенном слое воды, тем больше образуется органического вещества за счет фотосинтеза. В то же время растительный планктон, поглощая и рассеивая лучи света, препятствует их проникновению в водную толщу. Поэтому с увеличением фитопланктона в фотической зоне водоема хотя и становится выше общая первичная продукция всей популяции, интенсивность фотосинтеза, приходящегося на единицу биомассы водорослей, снижается из-за ослабления лучистой энергии клетками самих водорослей. Интегральная величина продукции органического вещества в столбе воды под 1 м² в таких случаях оказывается ниже ожидаемой по данным о фитопланктоне.

Затенение планктонными водорослями сказывается и на фотосинтезе донных растений. В известной степени оно может лимитировать нижнюю границу их произрастания и величину создаваемой ими первичной продукции.

Уменьшение глубины проникновения лучистой энергии при массовой вегетации растительного планктона в водоеме отмечается многими исследователями. Оно обнаруживается не только с помощью фотоэлектрических (Pearsall a. Ullyott, 1934; Talling, 1960; Тимофеева, 1966; Брагинский, 1968) или термоэлектрических (Боровкова, 1967) приборов, но и простыми измерениями относительной прозрачности по белому диску (Riley, 1956; Riley a. Shurr, 1959, цит. по: Talling, 1960). Однако специальных данных, характеризующих закономерность связей между условиями распространения солнечной радиации и степенью развития фитопланктона в водоемах, известно мало. Из указанных работ прямое отношение к рассматриваемому вопросу имеют лишь исследования английских ученых (Pearsall a. Ullyott, 1934; Talling, 1960), которые были выполнены в прозрачном озере Уиндермир. Они основаны на результатах сезонных наблюдений за развитием планктонных водорослей и глубиной проникновения определенного относительного количества солнечного света (несколько процентов от поверхностного), которую принято считать нижней границей фотосинтезирующей зоны водоема. Авторы убедительно показали постепенное сокращение освещенного слоя воды по мере нарастания численности массовых видов фитопланктона (*Asterionella formosa* Hass.,

реже виды синезеленых) и сделали попытку объяснить закономерности этого явления. Таллингу (Talling, 1960), применившему фотоэлемент с набором светофильтров, удалось установить спектральные различия в ослаблении проникающего света за счет фитопланктона и получить достаточно четкую корреляцию между показателем ослабления и числом клеток или содержанием хлорофилла в единице объема воды.

В данной работе на примере двух волжских водохранилищ — Куйбышевского и Волгоградского — рассматривается влияние фитопланктона на распространение солнечной радиации в менее прозрачных водоемах, в которых к тому же низкая прозрачность воды обусловлена не водорослями, а другими компонентами взвеси. Последние могут играть существенную роль в ослаблении проникающей радиации и в какой-то мере затушевывать влияние фитопланктона. Это отмечалось даже при изучении оптических свойств прозрачных морских вод, взятых из прибрежных районов и характеризующихся повышенным содержанием минеральных взвесей (Wyrski, 1950).

Куйбышевское и Волгоградское водохранилища являются типичными мезотрофными водоемами. Биомасса фитопланктона в них изменяется в пределах 1—10 мг/л (Мороховец, 1959; Шило, 1965). Относительная прозрачность воды по белому диску составляет 1—2 м, цветность воды по платиново-кобальтовой шкале — 30—40°. Содержание общей взвеси, по данным В. М. Широкова (1962) для Куйбышевского водохранилища, при такой прозрачности воды обычно колеблется в пределах 5—10 мг/л.

Сведений о качественном составе взвеси в этих водоемах найти не удалось. Однако некоторое представление о нем можно получить косвенным путем. Если принять, что влажность водорослей близка к 80 %, вес указанной выше биомассы (1—10 мг/л) в сухом виде будет равняться 0.2—2 мг/л. От 5—10 мг/л общей сухой взвеси (данные В. М. Широкова) это может составить 4—20 %. Близкое процентное соотношение между планктоном и остальной взвесью было установлено Н. А. Зиминской (1965) при непосредственном анализе в водах Рыбинского водохранилища. Максимальное содержание планктона от общей взвеси, по мнению Н. А. Зиминской, не превышает 20 %. Заметим, что эта величина относится к планктону в целом, где водоросли составляют лишь некоторую часть. Таким образом, можно полагать, что в исследованных нами водохранилищах на долю сухого фитопланктона приходится не более 20 % от веса всей взвеси.

В то же время следует иметь в виду, что в водоеме роль фитопланктона в ослаблении подводной радиации, по-видимому, существеннее, чем можно ожидать по данным лишь о составе сухой взвеси. В воде помехой для потока лучистой энергии являются сырые частицы. Процентное содержание водорослей в сырой взвеси, вероятно, несколько больше, чем в сухой, так как из всех ее компонентов растительные клетки характеризуются наибольшей влажностью. Кроме того, находящиеся в водной среде водоросли вследствие своей сложной формы и структуры оболочек могут оказывать специфическое влияние на распространение лучей света. Все это свидетельствует о сложности поставленного вопроса и о необходимости специальных опытов в водоеме для его решения. Настоящая работа является одной из первых попыток в этом направлении.

Работа проводилась с экспедиционного судна на суточных станциях, выполнявшихся в различных участках исследуемых водохранилищ. На каждой станции 3 раза в день (в 6, 12 и 18 час.) на разных глубинах велись одновременные наблюдения за энергией солнечной радиации и количеством фитопланктона. Предполагалось, что повторные измерения в одном и том же пункте позволят уловить те отклонения в ходе проникающей радиации, которые могут быть обусловлены суточными колебаниями в вертикальном распределении фитопланктона данной станции.

Энергия проникающей радиации (облученность) измерялась термоэлектрическим подводным пиранометром Ю. Д. Янишевского. Прибор и методика наблюдений с ним описаны Т. В. Кириловой и Р. Ф. Бюриг (1958), а применительно к нашим исследованиям — В. А. Рутковской (1961, 1965). Измерения проводились на горизонтах 0—5, 10, 20, 50, 70, 100, 120, 150, 200, 220, 250 см и далее через 50 см до глубины, где пороговая чувствительность прибора не позволяла получать достоверные данные. Одновременно с измерениями радиации на глубинах велись наблюдения за суммарной радиацией, падающей на поверхность водоема. В приполуденные часы учитывалась радиация, отраженная от воды (альбедо). Солнечная энергия на различных глубинах рассчитывалась в процентах по отношению к энергии, вошедшей в воду, т. е. исправленной на альбедо. Для утренних и вечерних часов, когда альбедо не измерялось, оно находилось по эмпирической кривой зависимости его величины от высоты солнца h_{\odot} , полученной В. А. Рутковской (1962) на Рыбинском водохранилище. Найденные таким путем значения альбедо оказались близкими вычисленным по формуле А. А. Пивова-рова и В. С. Лаворко (1961).

Наблюдения за подводной радиацией сопровождалась измерениями относительной прозрачности воды по белому диску и ее цветности по платиново-кобальтовой шкале.

Пробы фитопланктона брались через 0.5 м до нижней границы исследуемого слоя воды. Численность и биомасса водорослей определялись по общепринятой методике (Яшнов, 1934).

Т а б л и ц а 1

Условия наблюдений на станциях

Станция	Время наблю- дения, час. мин.	Высота, солнца, h_{\odot}	Прозрач- ность, см	Цветность, град.
К у й б ы ш е в с к о е в о д о х р а н и л и щ е				
Близ сел. Ильинки (№ 1)	6 31	22.7	90	—
	12 31	56.6	90	—
	18 26	16.1	80	—
Близ г. Свияжска (№ 2)	6 55	25.9	120	—
	12 36	56.3	150	30
	18 26	15.8	120	—
Близ сел. Камское Устье (№ 3)	6 36	23.0	105	—
	12 30	57.0	110	30
	18 23	15.7	105	—
Близ сел. Шиловки (№ 4)	5 16	12.4	115	34
	12 29	57.8	140	34
	18 24	15.2	110	34
Сусканский залив (№ 5)	5 12	11.7	75	34
	12 35	57.9	65	—
	18 25	14.9	70	34
Черемшанский залив (№ 6)	5 07	10.0	170	32
	12 33	57.2	60	32
	18 26	14.6	85	32
Близ сел. Березовки (№ 7)	5 18	11.3	0 *	44
	12 27	57.9	100	44
	18 23	14.6	125	44
Близ сел. Переволоки (№ 8)	5 17	11.1	110	46
	12 26	57.7	120	46
	19 17	6.8	90	46
В о л г о г р а д с к о е в о д о х р а н и л и щ е				
Близ сел. Федоровки (№ 9)	5 14	9.9	100	42
	12 20	58.0	93	—
	19 13	6.7	90	—
Близ сел. Чардыма (№ 10)	5 03	8.4	120	42
	12 24	58.4	130	—
	19 04	6.9	125	—
Близ сел. Нижней Банновки (№ 11)	5 06	7.5	230	36
	12 22	59.3	230	36
	19 09	5.9	200	36

* Сплошной слой водорослей.

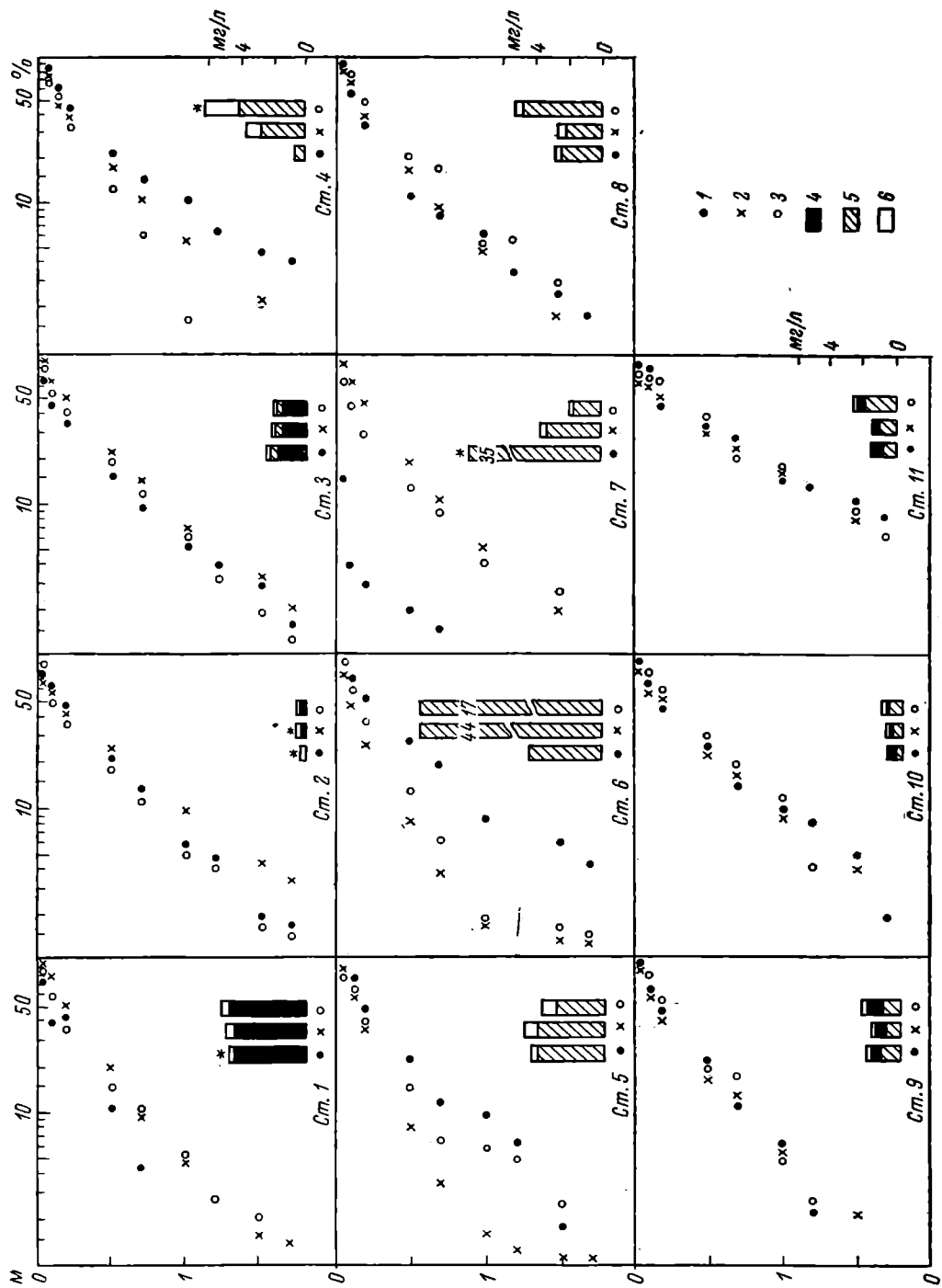


Рис. 1. Изменение энергии радиации с глубиной при различной плотности популяций водорослей в освещенном слое воды.

1 — утром; 2 — днем; 3 — вечером; 4 — средняя плотность диатомовых в слое 0—200 см (высота данного прямоугольника соответствует 1 мг биомассы в 1 л); 5 и 6 — то же соответственно для синезеленых и прочих водорослей. По оси координат слева — глубина, м, справа — биомасса, мг/л, то оси абсцисс — % проникновения радиации (облученности). Звездочкой отмечены данные, полученные только по одной пробе для исследуемого слоя воды.

Состав и биомасса (мг/л) фитопланктона на станциях

Номер стан- ции	Время наблю- дения	Массовые формы фитопланктона	Биомасса на глубинах, см						
			0	50	100	150	200	250	300
К у й б ы ш е в с к о е в о д о х р а н и л и щ е									
1	у д в	Виды <i>Melosira</i> , <i>Cyc- lotella</i>	4.98	6.45	3.99	—	—	—	—
			4.73	5.18	—	5.80	—	5.20	—
			5.67	6.27	4.87	5.86	—	4.83	—
2	у д в	Виды диатомовых и синезеленых	0.33	0.35	—	—	—	0.09	—
			—	—	0.69	0.34	0.46	0.29	0.37
			0.26	0.59	1.29	0.22	—	0.82	—
3	у д в	Виды <i>Melosira</i> , <i>Cyc- lotella</i>	3.26	2.53	2.81	2.48	—	1.94	—
			3.09	2.58	1.91	2.59	1.39	2.28	2.49
			2.45	2.15	2.22	2.33	—	1.55	—
4	у д в	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	0.48	0.55	0.71	1.21	—	0.33	—
			2.00	3.64	—	5.29	3.97	11.6	3.04
			—	5.88	2.47	—	11.6	—	—
5	у д в	<i>A. flos-aquae</i>	4.89	5.73	1.23	—	8.13	—	5.94
			3.65	7.28	6.08	5.37	—	3.23	—
			3.24	3.21	4.67	5.02	—	3.81	—
6	у д в	<i>A. flos-aquae</i>	13.1	1.88	2.27	—	4.00	—	—
			153.0	31.9	15.1	—	6.78	—	—
			34.4	15.1	18.7	—	4.48	—	—
7	у д в	<i>A. flos-aquae</i>	35.1	—	—	—	—	—	—
			6.63	5.89	—	2.28	—	0.61	—
			—	0.52	3.61	2.22	1.93	—	0.68
8	у д в	<i>A. flos-aquae</i>	6.49	1.80	1.60	3.45	2.12	—	1.20
			2.59	3.59	—	2.69	2.53	2.30	3.50
			8.52	—	4.23	—	5.13	—	—
В о л г о г р а д с к о е в о д о х р а н и л и щ е									
9	у д в	<i>A. flos-aquae</i> , виды <i>Melosira</i> , <i>Cyclo- tella</i>	2.37	2.67	1.83	2.05	—	2.62	—
			1.73	—	—	—	2.13	—	2.30
			2.67	2.42	2.41	—	2.87	—	—
10	у д в	Виды диатомовых, синезеленых, про- тококковых	0.71	1.15	1.12	0.97	—	0.84	—
			1.26	1.21	0.94	—	1.20	—	1.45
			2.14	0.74	1.31	1.32	—	1.71	—
11	у д в	<i>Aphanizomenon flos-aquae</i> , виды <i>Anabaena</i> , <i>Melosira</i>	2.04	2.44	1.02	1.84	1.10	1.54	—
			2.50	1.50	1.88	—	0.84	—	1.08
			3.96	2.93	1.58	—	—	—	2.19

П р и м е ч а н и е. у — утро, д — день, в — вечер.

Большая часть работы была выполнена при тихой погоде (штиль, рябь) в безоблачные и малооблачные дни, поэтому влияние гидрометеорологических условий на результаты разных сроков наблюдений считалось несущественным. Отмеченные при этом различия в высотах солнца над горизонтом (6—58°; табл. 1) также сравнительно мало отразились на относительной величине проникновения энергии радиации (рис. 1).

Исследованиями были охвачены различные по гидрологическому режиму районы водохранилищ: более узкие и проточные участки (ст. 1, 2, 8—10; табл. 1) и широкие плесы с замедленным водообменом (ст. 3—7, 11). Прозрачность воды в первых обычно ниже, цветность воды в тех и других районах различалась сравнительно мало (табл. 1).

По фитопланктону (табл. 2) можно выделить станции с преобладанием диатомовых водорослей, которые расположены преимущественно в речных участках или прилегающих к ним плесах (ст. 1, 3, 9), и станции с массо-

вым развитием синезеленых водорослей, находящиеся главным образом в расширенных нижних районах водохранилищ (ст. 4—8, 11). На нескольких станциях (2, 10) фитопланктон был смешанным по составу, но преобладали виды диатомовых и синезеленых. В тех местах, где развивался фитопланк-

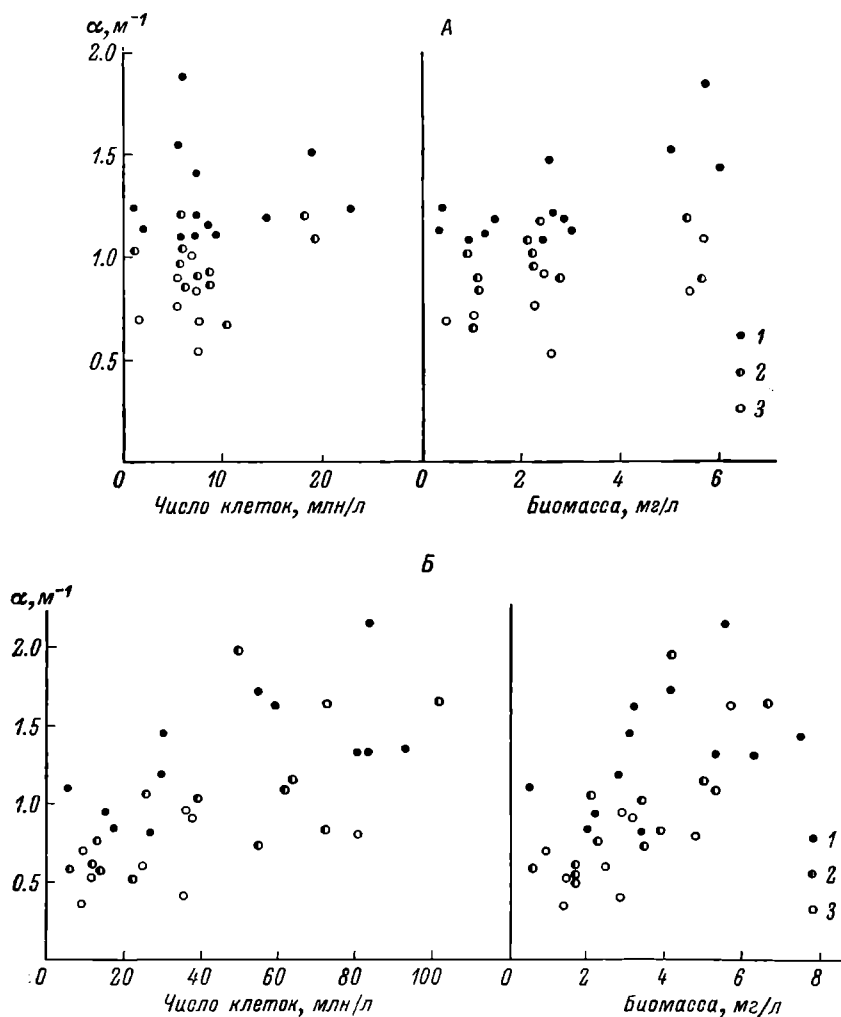


Рис. 2. Зависимость показателя вертикального ослабления общей солнечной радиации (α) от плотности популяции фитопланктона из диатомовых водорослей и смешанного (А) и из синезеленых (Б).

1 — для слоя 10—50 см; 2 — для слоя 50—100 см; 3 — для слоя 100—150 см.

тон из диатомовых или смешанный, плотность водорослей и их вертикальное распределение обычно мало менялись в течение дня. В районах массового развития синезеленых, напротив, почти всегда наблюдались большие колебания как в общей биомассе для всего освещенного слоя, так и в распределении ее по глубинам. Как известно, эти водоросли в штилевую погоду способны подниматься к поверхности воды. При движении водной массы, даже таком незначительном, которое вызывается конвективными токами, возникающими ночью вследствие остывания водоема, клетки водорослей легко увлекаются вниз. В результате во время «цветения» воды синезелеными их количество в освещенной зоне за сутки может

существенно измениться. Например, на ст. 6 биомасса водорослей в верхнем полуметровом слое в течение первой половины дня увеличилась с 13 до 153 мг/л. Изменения в проникновении радиации за счет этого были заметны не только по данным подводного пиранометра, но и по белому диску.

Ослабление солнечной энергии (облученности) в водах с различным фитопланктоном показано на рис. 1. Плотность водорослей здесь дана в биомассе (мг/л), средней для слоя 0—2 м. Кривые ослабления энергии радиации, выраженной в процентах от вошедшей в воду, построены в полулוגарифмическом масштабе. Такие кривые, как известно, в оптически однородных водах должны быть близки к линейным. Это достаточно хорошо соблюдается на станциях с довольно равномерным и постоянным распределением водорослей (ст. 1—3, 8—11). Особенно выделяется ст. 11, где прозрачность воды наиболее высока, а фитопланктона сравнительно мало. Другая картина наблюдается на станциях, расположенных в районах массового развития синезеленых (ст. 4—7). Ослабление энергии радиации для разных сроков здесь заметно различается, а кривые ее распределения по глубинам часто отклоняются от линейного хода. В тех случаях, когда «цветение» особенно интенсивно (ст. 6 и 7), суточные различия в характере ослабления радиации почти полностью согласуются с изменениями плотности популяции водорослей. При этом точки, относящиеся к тем срокам наблюдений, когда биомасса водорослей в фотической зоне наибольшая (ст. 6 — полдень, вечер, ст. 7 — утро), смещены в сторону минимальных значений облученности. Если в этом случае вертикальное распределение фитопланктона неравномерно (рис. 1 и табл. 2), наиболее отклонены точки, относящиеся к горизонтам, которые находятся ниже слоя воды с повышенной плотностью водорослей (ст. 6).

Суточные различия в ослаблении лучистой энергии, проникающей сквозь определенный слой воды, на одних и тех же станциях можно объяснить лишь воздействием планктона. Влияние других факторов (остальная взвесь, цветность воды) маловероятно. За день они не могли сильно измениться, так как на обеих станциях во время наблюдений и в предшествующие дни стояла штилевая погода, а течение в этих районах практически отсутствует (Чигиринский, 1967).

На основе полученных данных была сделана попытка оценить количественно воздействие фитопланктона на проникновение лучистой энергии в глубь водоема. Для этого мы воспользовались показателем вертикального ослабления солнечной радиации (облученности). Напомним, что под ним понимается величина, обратная расстоянию, на котором поток проникающего излучения в результате совместного действия поглощения и рассеяния ослабляется в 10 раз. Он рассчитывается по формуле

$$\alpha, \text{ м}^{-1} = \frac{1}{Z_2 - Z_1} \lg \frac{Q_1}{Q_2},$$

где $Z_2 - Z_1$ — толщина слоя воды, м; Q_1 и Q_2 — облученность на верхней и нижней границах слоя. Поскольку часть опытов была выполнена при неравномерном распределении водорослей по глубинам, показатели вертикального ослабления радиации рассчитывались для нескольких слоев воды: 10—50, 50—100 и 100—150 см. Таким способом были обработаны данные всех станций с биомассой фитопланктона в пределах 10 мг/л, которая, как упоминалось, наиболее типична для исследованных водоемов.

Между величинами α , полученными в указанных слоях воды на разных станциях, и количеством находящихся там водорослей устанавливалась коррелятивная зависимость. При этом результаты всех опытов были

разделены на 2 группы. В одной оказались данные, относящиеся к станциям с повышенной проточностью и мутностью воды и с преимущественным развитием диатомового и смешанного планктона, в другой — данные, полученные на станциях с замедленным водообменом и более прозрачной водой, «цветущей» синезелеными водорослями. В первой группе (рис. 2, А) не наблюдалось зависимости показателя вертикального ослабления радиации от плотности популяции водорослей, учтенных как по числу клеток, так и по биомассе. Во второй группе (рис. 2, Б) выявилась вполне определенная тенденция — повышение этого показателя по мере увеличения количества водорослей. Интересно, что в обеих группах разброс данных оказался меньше в случае сопоставления α с биомассой, а не с численностью клеток. Это можно объяснить тем, что многие планктонные водоросли являются колониальными формами, вследствие чего их численность обычно не соответствует числу образуемых ими частиц. Учесть число колоний весьма затруднительно, так как в процессе обработки проб фитопланктона они в значительной степени распадаются. Таким образом, в подобных случаях биомасса может служить наиболее достоверным показателем плотности популяции фитопланктона.

По данным, полученным для вод с преобладанием синезеленых водорослей (рис. 2, Б), удалось установить искомую коррелятивную зависимость величин α от плотности водорослей. Теснота связи при этом оценивается коэффициентом корреляции r средней значимости: 0.64 ± 0.14 (при сопоставлении с численностью) и 0.66 ± 0.13 (при сопоставлении с биомассой). Если для анализа этой связи допустить применимость уравнения прямой линейной регрессии типа $y = a + bx$, где за y принят показатель вертикального ослабления облученности (α), а за x — биомасса фитопланктона, то параметры a и b , вычисленные по методу наименьших квадратов, будут равны соответственно 0.48 и 0.17. Это может означать следующее. При полном отсутствии фитопланктона ($x=0$, $y=a$) значение α составило бы 0.48, т. е. десятикратное ослабление солнечной радиации наблюдалось бы в 2-метровом слое воды. При плотности водорослей в 1 мг/л (по биомассе) показатель α будет равен примерно 0.65, а глубина десятикратного ослабления энергии радиации — около 1.5 м. С увеличением плотности водорослей еще на 1 мг/л эта глубина уменьшится до 1.3 м. Естественно, при том сравнительно невысоком коэффициенте корреляции, который получен нами, подобные расчеты весьма приблизительны. Однако их все же следует иметь в виду.

Отсутствие более тесной связи между рассматриваемыми показателями частично можно объяснить тем, что коэффициенты α относятся к слоям воды с разной глубины. Как видно из рис. 2, при любом количестве водорослей наиболее высокие значения α получены главным образом для верхнего слоя воды (10—50 см), а минимальные — для нижнего (100—150 см). Надо полагать, что в случае однородных величин α , вычисленных по одному и тому же слою воды, разброс данных был бы меньше.

Нельзя не учитывать и то обстоятельство, что в исследованных водах количество фитопланктона по сравнению с другими взвешенными частями невелико и что последними может ослабляться значительная часть проникающего излучения. Содержание остальной взвеси в водах разных станций неодинаково. Ее влияние не могло быть полностью исключено, хотя и были сделаны попытки разделить данные всех станций на 2 группы по признакам, имеющим к ней отношение (проточность и прозрачность водных масс). Этим также могут быть обусловлены колебания величин α , отмеченные при одной и той же плотности фитопланктона.

Подтверждением того, что в водоемах такого типа, какими являются Куйбышевское и Волгоградское водохранилища, значительная часть лучистой энергии ослабляется не фитопланктоном, а другой взвесью, могут

Соотношение между фитопланктоном и общей взвесью в Рыбинском водохранилище и прилегающих водоемах (по Ильинскому, 1965)

Номер опыта	Станция	Взвесь, мг/л	Фитопланктон		
			биомасса, мг/л	сухой вес, мг/л (20% от биомассы)	% от взвеси
1	У сел. Измайлова . .	2.0	1.74	0.35	18
2	Р. Суда	3.0	2.45	0.49	16
3	Оз. Сиверское	5.7	6.50	1.30	23
4	У бывш. сел. Шумарова	5.8	2.39	0.48	8
5	У бывш. сел. Наволок	6.4	3.93	0.79	12
6	У сел. Коприна	8.0	3.36	0.67	8
7	У сел. Мякса	15.0	2.33	0.47	3
8	У г. Череповца	26.4	6.50	1.30	5
9	Оз. Белое	54.8	3.01	0.60	1

служить результаты работы А. Л. Ильинского (1965), выполненной в Рыбинском водохранилище и прилегающих водоемах. Автором изучалось проникновение солнечного света, измеренного селеновым фотоэлементом, в воды с разным содержанием взвешенных веществ. По данным этой работы мы вычислили показатели вертикального ослабления света α метровым слоем воды и сопоставили их с количеством общей взвеси (рис. 3). Связь между ними оказалась более тесной ($r = 0.96 \pm 0.10$), чем при сопоставлении α с фитопланктоном. Процент водорослей от общей взвеси в опытах А. Л. Ильинского был неодинаков (табл. 3), но это практически не отразилось на величинах α .

Результаты настоящих исследований приводят к заключению, что роль планктонных водорослей в световом режиме волжских водохранилищ относительно невелика. Это обусловлено тем, что в их водах кроме фитопланктона находится много взвеси из минеральных компонентов, детрита и других частиц. Последними поглощается и рассеивается значительная часть проникающего излучения и затухает ослабление его за счет водорослей.

Особенно слабо ощущается влияние фитопланктона на проникновение солнечной радиации в районах массового развития диатомовых. Оно не проявляется даже при наиболее высоких из наблюдающихся здесь значениях биомассы (5—6 мг/л). Гораздо больше ослабление фитопланктоном проникающего излучения в водах, «цветущих» синезелеными. При интенсивном «цветении», когда биомасса водорослей в 1 л воды фотической зоны измеряется десятками миллиграммов, снижение облученности за счет этого становится весьма заметным.

То, что влияние фитопланктона из синезеленых оказалось более ощутимым, чем диатомового, обусловлено не особенностями популяций водорослей, а свойствами водной среды. Как правило, во время наших наблюдений диатомовые преобладали в проточных и более мутных водах. «Цветение»

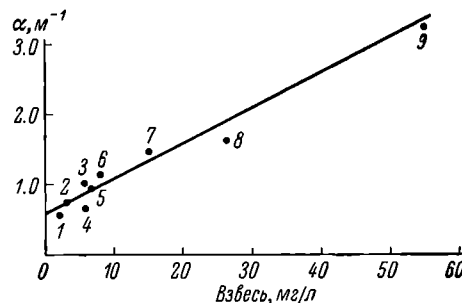


Рис. 3. Зависимость показателя вертикального ослабления видимого света (α) от количества общей взвеси для слоя воды 0—100 см.

Цифры у точек соответствуют номерам опытов, указанным в табл. 3.

синезелеными, напротив, обычно сочеталось с наибольшей прозрачностью водных масс. Надо полагать, что планктон из диатомовых не меньше влияет на проникающую радиацию. Весьма возможно, что диатомеи благодаря своей кремневой оболочке и структурным образованиям на ней могут оказывать даже более сильное воздействие на распространение лучистого потока в водоеме, чем другие водоросли. Однако оно не было заметно из-за повышенной мутности тех вод, в которых развивались диатомовые. В связи с этим напомним, что в исследованиях Таллинга (Talling, 1960), которые выполнялись в прозрачном озере, хорошо показан эффект самозатенения в популяции диатомового планктона при сравнительно невысокой ее плотности (около 1 мг/л по биомассе)

ЛИТЕРАТУРА

- Боровкова Т. Н. 1967. Поглощение солнечной радиации водными массами Куйбышевского водохранилища. Тр. Главн. геофиз. observ., вып. 206.
- Брагинский Л. П. 1968. К фотометрии «цветущих» вод. В кн.: «Цветение» воды. Киев.
- Зиминова Н. А. 1965. Состав взвесей Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (40).
- Ильинский А. Л. 1965. Влияние цветности и мутности воды на фотосинтез водорослей. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 11 (14).
- Кирilloва Т. В., Р. Ф. Бюриг. 1958. О результатах измерения подводной радиации. Тр. Главн. геофиз. observ., вып. 78.
- Мороховец Л. В. 1959. Фитопланктон Куйбышевского водохранилища в год его заполнения. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2 (5).
- Пивоваров А. А., В. С. Лаворко. 1961. О суточном ходе составляющих солнечной радиации и альбедо моря. Метеорол. и гидрол., № 1.
- Рутковская В. А. 1961. Предварительные итоги исследования проникновения солнечной радиации в водную толщу водохранилищ и озер. В кн.: Первичная продукция морей и внутренних вод. Минск.
- Рутковская В. А. 1962. Характеристики некоторых радиационных свойств озер, водохранилищ и морей. Тр. Инст. океанол. АН СССР, т. 57.
- Рутковская В. А. 1965. Проникновение солнечной радиации в водоемы суши и моря. Тр. Инст. океанол. АН СССР, т. 78.
- Тимофеева В. А. 1966. Подводная освещенность в Черном море и ее связь с планктоном. Тр. Морск. гидрофиз. инст. АН УССР, т. 37.
- Чигиринский П. Ф. 1967. Сточное течение в Куйбышевском водохранилище по данным съемок 1963 и 1964 гг. Сб. работ Комсомольской гидрометеорол. observ., вып. 7, Л.
- Шило И. Н. 1965. Фитопланктон Волгоградского водохранилища в 1963—1964 гг. Тр. Саратовск. отд. Гос. инст. речн. и озерн. рыбн. хоз., т. 8.
- Широкое В. М. 1962. Режим прозрачности и мутности воды Куйбышевского водохранилища. Сб. работ Комсомольской гидрометеорол. observ., вып. 2, Куйбышев.
- Яшнов В. А. 1934. Инструкция по сбору и обработке планктона. М.
- Pearson W. H. and P. Ullott. 1934. Light penetration into freshwater. 3. Seasonal variation in the light conditions in Windermere in relation to vegetation. J. Exp. Biol., vol. XI, No 1.
- Talling J. F. 1960. Self-shading effects in natural populations of a planctonic diatom. Wetter und Leben, Jahrg. 12, H. 9—10.
- Wyrski K. 1950. Über die Beziehung zwischen Trübung und oceanographischem Aufbau. Kieler Meeresforschungen, Bd. VII (2).
-

Н. В. Б у т о р и н и Н. П. С м и р н о в

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНЫХ МАСС РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Вследствие неравномерного поступления солнечной энергии на земную поверхность происходят изменения погодных условий Земли, определяющие физико-географические особенности отдельных ее районов и ход метеорологических элементов. Последние, в свою очередь, обуславливают колебания и изменения гидрологических характеристик водоемов.

Наличие колебаний и больших изменений гидрологических характеристик в водоемах общеизвестно. Это особенно четко прослеживается в водохранилищах. Так, в период наполнения Горьковского водохранилища уровень воды в приплотинной части поднимается за сутки на 12—16 см, а суточная величина повышения уровня Рыбинского водохранилища достигает иногда 20—30 см (Буторин, 1969). Весьма существенны колебания температуры воды в течение суток. Суточная амплитуда температуры поверхностного слоя воды в Рыбинском водохранилище часто превышает 2°, а в Горьковском в ясные штилевые дни достигает 6° (Эдельштейн, 1968).

Еще более резко выражены в водохранилищах сезонные изменения гидрологических характеристик, особенно колебаний уровня. В отдельные годы амплитуда колебаний уровня Рыбинского водохранилища превышает 500 см, а в нижнем бьефе Угличской ГЭС — даже 800 см. Сезонная амплитуда температуры воды поверхностного слоя в волжских водохранилищах выше 20°. Большие изменения по сезонам наблюдаются также в величинах цветности и прозрачности вод водохранилищ. Окрашенность воды Рыбинского водохранилища в поверхностном слое изменяется от 20 до 230°, а с учетом измерений в низовьях рек и зонах временного затопления эти пределы расширяются до 5—245° (Фортунов, 1959). Прозрачность воды в Рыбинском водохранилище зимой обычно в 1.5—2, а иногда и в 3 раза выше, чем летом.

Поскольку своеобразие гидрологического режима определяет свойства вод, наполняющих водохранилища, естественно ожидать подобных изменений и в химических характеристиках водных масс. Имеющиеся литературные данные подтверждают это. А. П. Щербаков (1950) указывает на наличие суточных колебаний содержания кислорода, pH и бикарбонатов в воде Волги. Им же и другими исследователями (Безлер, 1963; Зенин, 1965; Эдельштейн, 1968; Буторин, 1969) описаны сезонные изменения химического состава вод волжских водохранилищ.

Если о суточных и сезонных изменениях гидрологических и химических характеристик вод водохранилищ накоплен обширный материал

и они достаточно полно освещены в литературе, то о многолетних вариациях их можно только предполагать. В подавляющем большинстве случаев водохранилища — «молодые» географические объекты. Продолжительность их существования исчисляется одним—двумя десятилетиями. Поэтому изучение многолетних изменений характеристик вод этих водоемов — задача будущего.

Наряду с временной изменчивостью характеристик водных масс водохранилищ наблюдается большая изменчивость их в пространстве, т. е. по акватории водоемов. Это связано прежде всего с тем, что физические и химические характеристики вод источников, питающих водохранилища, часто существенно различаются между собой. Поступая в водоем замедленного водообмена, эти воды в определенных его районах продолжительное время сохраняют свои особенности (Буторин, 1969). Специфические черты морфометрии и искусственное регулирование стока усиливают неоднородность распределения характеристик водных масс по акватории водохранилищ.

Изучение динамики характеристик водных масс, а также причин их изменчивости представляет большой научный и практический интерес. Анализ временной и пространственной изменчивости гидрологических и химических характеристик вод позволит прежде всего оценить масштабы физических процессов, протекающих в водохранилищах, определить роль отдельных характеристик в общей изменчивости гидрологического режима, показать влияние той или иной характеристики на ход биологических процессов и на формирование качества воды. В результате можно будет получить научно обоснованные данные относительно дискретности наблюдений за различными характеристиками во времени и в пространстве, определить необходимую точность измерений и некоторые другие сведения для разработки научных основ автоматизации сбора и анализа информации о гидрологическом и гидрохимическом режиме водохранилищ.

Изменчивость характеристик вод искусственных водоемов исследуется нами на примере Рыбинского водохранилища. Этот водоем является одним из крупнейших в системе волжского каскада. Географическое положение его таково, что в перспективе водные ресурсы водохранилища могут быть использованы для водоснабжения Центрального промышленного района и прежде всего г. Москвы. В связи с этим исследование физических и химических характеристик водных масс водохранилища, а также закономерностей их временной и пространственной изменчивости представляет большой практический интерес.

Помимо этого, Рыбинское водохранилище является наиболее изученным из всех имеющихся водохранилищ. Оно наиболее полно освещено материалами наблюдений. Особую ценность для решения поставленной задачи представляют данные синхронных съемок водохранилища. В течение 1960—1964 гг. Институтом биологии внутренних вод АН СССР было выполнено 33 таких съемки. Они проводились в различные сезоны года по единой сетке станций (рис. 1). В зависимости от сезона число станций изменялось от 25 до 60. Все съемки выполнялись одним составом наблюдателей, по единой методике, однотипными приборами. Одновременное участие в работе 4 судов позволило ограничить время каждой съемки 12—14 час. (Буторин, 1965). Большая ценность материалов синхронных съемок заключается не только в их массовости и относительно равномерном освещении годового хода элементов гидрологического режима, но также в охвате наблюдениями различных по водности лет.

Сезонные изменения характеристик водных масс Рыбинского водохранилища рассмотрены нами лишь в общих чертах (Буторин, 1966, 1969; Буторин, Смирнов, 1968). Учитывая важность изучения их для решения широкого круга практических задач, мы сочли необходимым

дополнить результаты предшествующих исследований и рассмотреть сезонную динамику средних характеристик вод, наполняющих водохранилище (\bar{X}), точность их определения ($S_{\bar{x}}$), величины стандартных отклонений (σ) и информативность отдельных параметров, определяемую по величине энтропии (H). Необходимые расчеты указанных характеристик выполнены в Институте биологии внутренних вод АН СССР на ЭВМ «Наири». Полученные результаты представлены в табл. 1. Дина-

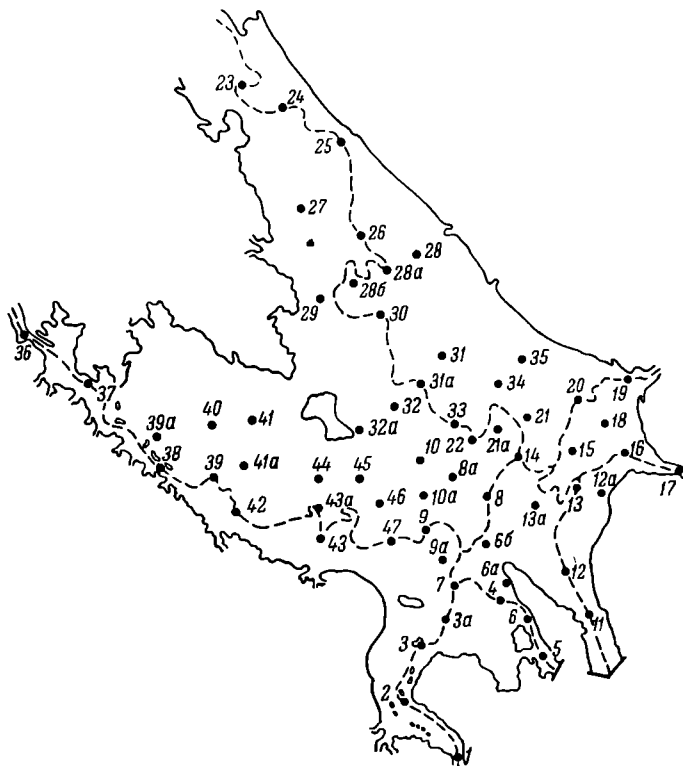


Рис. 1. Схема расположения станций синхронных гидрологических съемок на Рыбинском водохранилище.

мика средних значений рассматриваемых параметров в годовом цикле показана на рис. 2.

Из этого рисунка видно, что наиболее ярко выражен сезонный ход изменений средней температуры воды водохранилища. Так, в декабре—марте указанных лет она незначительно превышала нулевые значения, в то время как в июле достигала 22—24°. Наиболее интенсивный прогрев водохранилища происходит в мае и июне, когда среднее повышение температуры воды за месяц составляет 10°. Наиболее сильное выхолаживание водоема наблюдается в сентябре и октябре. Среднее понижение температуры воды за месяц в этот период равно примерно 7°. Сезонный ход температуры воды в водохранилище определяется прежде всего изменениями солнечной радиации.

Сезонные изменения в ходе других характеристик водных масс выражены слабее и обусловлены главным образом динамикой вод, поступающих в водохранилище. Так, наименьшая концентрация солей в водах Волги, Мологи и Шексны — основных реках, питающих Рыбинское водохранилище, отмечается во время весеннего половодья. Подобная картина прослеживается и в отношении общей жесткости воды. Летом и осенью

Средние значения характеристик вод Рыбинского водохранилища (\bar{X}),
и значения энтропии (H)

Дата	Температура, °C				Прозрачность, см				Цветность, град.			
	\bar{X}	$S_{\bar{X}}$	σ	H	\bar{X}	$S_{\bar{X}}$	σ	H	\bar{X}	$S_{\bar{X}}$	σ	H
1960 г.												
9 V	5.6	0.36	2.41	1.88	129	5	36	1.60	38	2	14	1.74
3 VI	16.5	0.11	0.89	1.82	179	3	28	1.65	35	2	13	1.64
12 VII	23.5	0.22	1.02	1.72	166	11	50	1.76	13	1	4	0.93
28 VII	23.6	0.05	0.37	1.64	134	4	30	1.87	26	1	7	1.46
4 X	9.0	0.07	0.52	1.54	169	4	30	0.68	30	1	4	1.20
27 X	1.1	0.14	0.81	1.63	117	6	37	1.52	31	1	5	1.27
1961 г.												
14—24 II	0.1	0.02	0.16	0.83	—	—	—	—	39	2	15	1.12
17—24 III	0.4	0.05	0.28	1.66	—	—	—	—	38	3	16	1.33
12 V	4.4	0.31	2.43	1.61	150	6	45	1.72	43	2	13	1.05
8 VI	19.7	0.17	1.38	1.76	172	5	41	1.81	44	3	23	1.72
3 VIII	21.3	0.06	0.48	1.60	134	3	27	1.67	46	1	8	1.24
10 X	9.8	0.03	0.24	1.67	134	4	28	1.68	40	2	11	0.61
13 XI	2.1	0.21	0.88	1.29	127	5	20	1.45	40	2	8	0.58
25—29 XII	0.0	0.01	0.04	0.15	—	—	—	—	48	2	9	1.63
1962 г.												
30 I—10 II	0.1	0.03	0.16	1.29	—	—	—	—	48	2	10	1.67
29 III—7 IV	0.1	0.02	0.10	0.78	—	—	—	—	40	3	12	1.68
12 V	7.4	0.18	1.42	1.91	106	4	30	1.48	60	2	12	1.00
6 VIII	17.6	0.13	1.08	1.64	114	3	22	1.67	59	1	5	0.48
4 XI	4.1	0.06	0.43	1.48	103	4	33	1.80	60	1	8	0.93
1963 г.												
30 I—6 II	0.1	0.02	0.14	0.31	—	—	—	—	—	—	—	—
18—21 IV	0.4	0.07	0.32	1.62	—	—	—	—	46	1	7	1.10
14 VI	13.2	0.05	0.42	1.57	—	—	—	—	64	1	5	0.99
3 VIII	21.5	0.11	0.92	1.45	143	5	37	1.81	45	1	5	0.98
4 IX	20.8	0.09	0.68	1.81	163	4	30	1.63	40	1	8	0.61
21 XI	1.0	0.05	0.33	1.76	—	—	—	—	49	1	9	1.57
1964 г.												
26 XII—4 I	0.2	0.05	0.26	1.28	—	—	—	—	48	2	9	0.47
25 II—3 III	0.1	0.02	0.11	1.28	—	—	—	—	51	2	10	1.39
11—15 IV	0.4	0.10	0.39	1.36	—	—	—	—	41	3	13	0.73
15 V	7.0	0.27	2.07	1.67	153	5	39	1.84	50	2	16	1.58
9 VI	15.1	0.09	0.72	1.81	138	4	32	1.74	47	2	17	1.08
1 VIII	20.0	0.09	0.69	0.74	130	4	28	1.77	41	1	6	1.33
3 XI	5.3	0.05	0.41	1.41	108	6	44	1.71	35	0	2	0.19
18 XII	0.5	0.03	0.12	1.04	80	3	12	1.46	34	0	2	0.32

происходит нарастание минерализации, достигающее максимальных значений зимой (Щербаков, 1950). Последовательность сезонного изменения общего соотношения ионов вод этих 3 рек обстоятельно рассмотрена Ф. И. Безлером (1963).

Сезонная изменчивость солевого состава вод сохранилась и в условиях водохранилища. Это отмечалось нами в ряде предшествующих работ (Буторин, 1966, 1969), поэтому здесь следует только сказать, что сезонная изменчивость четко проявляется и в осредненных значениях характеристик (табл. 1). Так, наибольшие величины электропроводности воды,

Таблица 1

ошибки среднего ($S_{\bar{x}}$) значения, стандартное отклонение (σ) по данным 33 съёмок

Электропроводность, мксим/см				Гидрокарбонаты, мг-экв./л				Жесткость, мг-экв./л				Кальций, мг-экв./л			
X	$S_{\bar{x}}$	σ	H	X	$S_{\bar{x}}$	σ	H	X	$S_{\bar{x}}$	σ	H	X	$S_{\bar{x}}$	σ	H
1960 г.															
157	8	56	1.87	1.39	0.08	0.52	1.89	1.65	0.08	0.55	1.89	1.21	0.06	0.40	1.90
153	4	34	1.93	1.37	0.04	0.33	1.88	1.64	0.05	0.37	1.68	1.19	0.03	0.23	1.91
163	4	18	1.82	1.04	0.06	0.26	1.78	1.80	0.04	0.17	1.75	1.36	0.03	0.14	1.56
156	2	15	1.74	1.36	0.02	0.16	1.63	2.12	0.03	0.22	1.89	1.31	0.02	0.12	1.60
169	4	30	0.68	1.43	0.04	0.34	0.57	2.15	0.04	0.32	1.53	1.51	0.03	0.24	1.66
175	6	34	1.13	1.47	0.07	0.40	1.41	1.95	0.06	0.32	1.41	1.43	0.06	0.32	1.29
1961 г.															
195	4	28	1.51	1.64	0.04	0.28	1.59	2.39	0.06	0.38	1.67	1.73	0.04	0.25	1.60
198	5	28	1.75	1.66	0.06	0.32	1.85	2.36	0.06	0.34	1.87	1.74	0.05	0.30	1.73
161	6	50	1.74	1.30	0.06	0.43	1.83	1.98	0.07	0.55	1.76	1.32	0.05	0.38	1.79
149	3	27	1.87	1.23	0.03	0.26	1.84	1.87	0.03	0.27	1.84	1.26	0.02	0.18	1.88
156	1	11	1.44	1.47	0.02	0.16	1.44	1.88	0.02	0.15	1.57	1.29	0.01	0.12	1.69
156	1	10	1.44	1.16	0.02	0.16	1.54	1.72	0.02	0.14	1.58	1.14	0.01	0.10	1.61
164	2	10	1.30	1.39	0.04	0.16	1.45	1.90	0.03	0.12	1.56	1.29	0.02	0.08	1.43
174	7	31	0.68	1.43	0.07	0.31	1.26	2.02	0.06	0.25	1.21	1.33	0.04	0.19	1.02
1962 г.															
188	7	32	1.21	1.62	0.09	0.44	1.07	2.44	0.08	0.38	1.51	1.55	0.06	0.30	1.27
243	16	74	1.57	2.15	0.16	0.72	1.71	2.81	0.16	0.75	1.73	1.87	0.11	0.50	1.71
138	5	41	1.89	1.14	0.05	0.40	1.80	1.66	0.05	0.42	1.93	1.08	0.04	0.31	1.90
150	3	21	1.64	1.24	0.03	0.23	1.48	2.61	0.05	0.39	1.38	1.50	0.03	0.24	1.69
156	3	25	1.28	1.31	0.04	0.28	1.39	2.18	0.04	0.31	1.69	1.39	0.03	0.25	1.54
1963 г.															
204	7	39	1.77	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
202	20	89	1.57	2.03	0.18	0.85	1.55	2.15	0.04	0.18	1.90	—	—	—	—
165	3	20	1.88	1.42	0.02	0.16	1.77	1.88	0.03	0.24	1.70	1.36	0.02	0.16	1.53
167	1	10	1.37	1.47	0.01	0.11	1.16	2.28	0.05	0.38	1.54	1.58	0.02	0.16	1.62
166	1	9	1.31	1.52	0.02	0.15	1.08	1.95	0.02	0.16	1.32	1.36	0.02	0.16	1.76
170	2	15	1.09	1.58	0.02	0.17	1.39	2.10	0.03	0.23	1.63	1.53	0.05	0.35	1.67
1964 г.															
189	4	22	1.70	1.77	0.04	0.20	1.60	2.31	0.05	0.28	1.57	1.66	0.02	0.15	1.69
232	8	40	1.64	2.15	0.08	0.41	1.65	2.72	0.09	0.46	1.71	1.87	0.07	0.34	1.82
274	22	86	1.55	2.43	0.20	0.77	1.44	3.00	0.24	0.94	1.52	2.14	0.16	0.63	1.41
198	8	59	1.89	1.75	0.07	0.56	1.91	2.22	0.08	0.60	1.83	1.53	0.05	0.42	1.90
218	5	42	1.81	1.64	0.04	0.33	1.90	2.09	0.05	0.36	1.89	1.45	0.03	0.24	1.78
175	2	15	1.78	1.54	0.02	0.12	1.79	2.00	0.03	0.20	1.26	1.42	0.01	0.11	1.80
175	3	22	0.81	1.50	0.03	0.22	1.12	1.93	0.04	0.31	0.60	1.32	0.03	0.22	0.70
171	2	7	1.28	1.56	0.02	0.08	1.44	1.89	0.02	0.06	1.50	1.29	0.01	0.06	1.08

жесткости, содержания карбонатов и ионов кальция наблюдаются в первой половине апреля, перед наступлением весеннего половодья или в начале его. В период наполнения водохранилища (май—июнь), наоборот, значения этих характеристик в целом по водоему наиболее низкие. Следовательно, даже средние значения всех рассмотренных характеристик воды Рыбинского водохранилища существенно изменяются по сезонам (рис. 2; табл. 1).

Поскольку особенности годового хода отдельных характеристик подробно описаны в литературе (Щербаков, 1950; Фортунатов, 1959; Без-

лер, 1963; Буторин, 1969, и др.), а их средние значения показаны на рис. 2, отметим лишь, что в отличие от температуры воды средние значения электропроводности, жесткости, карбонатов, ионов кальция, цветности и прозрачности существенно зависят от водности года.

Значительные различия в электропроводности, жесткости, особенно в содержании карбонатов и кальция в зависимости от водности года со-

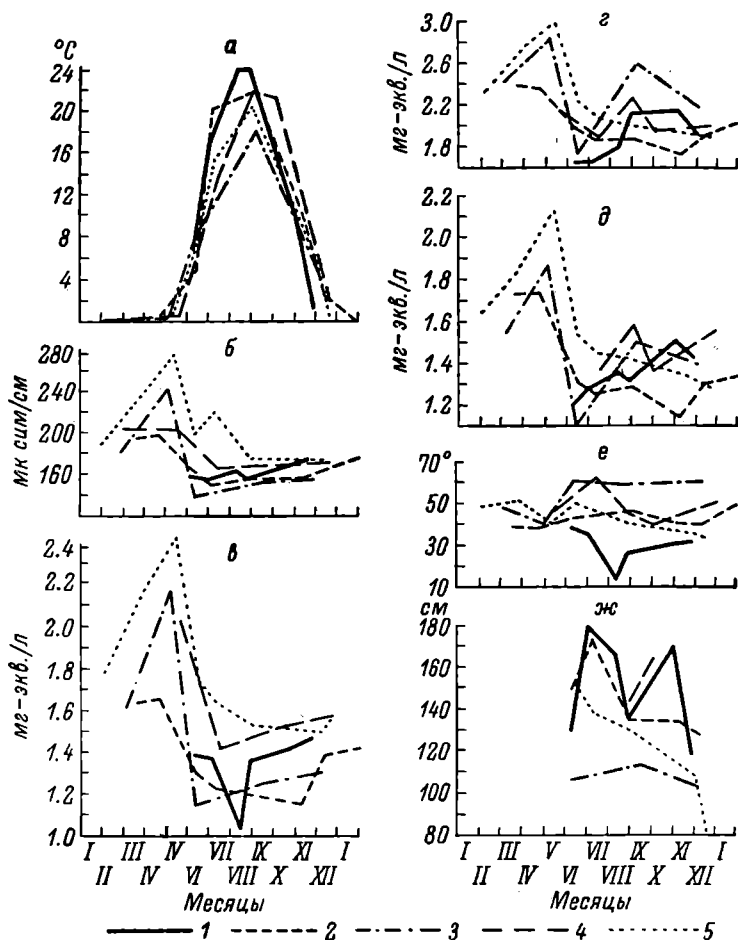


Рис. 2. Сезонный ход средних значений характеристик водной массы Рыбинского водохранилища.

а — температура; б — электропроводность; в — гидрокарбонаты; г — жесткость; д — кальций; е — цветность; ж — прозрачность. 1 — 1960 г.; 2 — 1961 г.; 3 — 1962 г.; 4 — 1963 г.; 5 — 1964 г.

храняются в течение всех сезонов года (рис. 3). Содержание карбонатов в воде водохранилища может быть выше (в маловодный год) или ниже (в многоводный) средних значений в течение всего года более чем на 10—20%.

Таким образом, средние значения электропроводности и основных компонентов солевого состава в маловодные годы значительно выше, чем в многоводные. Так, максимальное среднее значение электропроводности (274 мксим/см) наблюдалось в апреле маловодного 1964 г., а минимальное (138 мксим/см) — в мае наиболее многоводного 1962 г. В эти же годы содержание карбонатов составляло соответственно 2.43 и 1.14, кальция — 2.14 и 1.08 мг-экв./л, жесткость равнялась 3.00 и 1.66 мг-экв./л. Следо-

вательно, содержание солей в воде водохранилища в период его наполнения в зависимости от водности года может различаться более чем в 2 раза.

Связь с водностью года значительно слабее проявляется в ходе сезонных изменений прозрачности и цветности воды. Однако и в данном случае можно отметить, что самая низкая средняя прозрачность воды в летний период (110 см) наблюдалась в наиболее многоводном 1962 г. В сезонных изменениях цветности воды также заметны определенные различия в зависимости от водности года. Это наиболее четко проявляется с августа по ноябрь. Так, в многоводные 1961 и 1962 гг. значения цветности

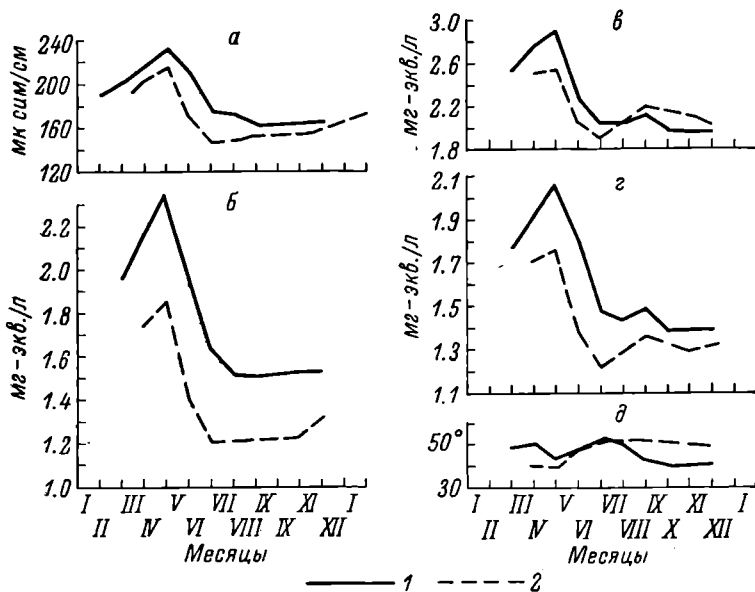


Рис. 3. Сезонный ход средних значений характеристик водной массы Рыбинского водохранилища в маловодные 1963—1964 гг. (1) и многоводные 1961—1962 гг. (2).

а — электропроводность; б — гидрокарбонаты; в — жесткость; г — кальций; д — цветность.

за указанный период в целом по водохранилищу на 10° превышали соответствующие величины маловодных 1963 и 1964 гг.

Об изменчивости исследуемых характеристик в годовом цикле можно судить также по величине стандартного отклонения (рис. 4), которая одновременно является показателем неоднородности вод водоема. Из данных табл. 1 следует, что наибольшие значения σ для большинства показателей (особенно температуры и электропроводности) отмечаются в весенний период. Так, для температуры воды максимальные значения σ из 5 лет исследований в течение 4 лет приходится на май и только в 1963 г. — на июль. Следовательно, неоднородность воды в водохранилище по температуре наиболее ярко выражена весной в период интенсивного наполнения водоема. Распределение температуры воды в водохранилище летом, осенью и зимой относительно однородно. Некоторое нарушение однородности прослеживается в период выхолаживания водохранилища, что наблюдается обычно в октябре—ноябре, реже в августе (рис. 4).

Еще более закономерен сезонный ход электропроводности воды и других характеристик солевого состава. В отличие от температуры максимальные значения σ для электропроводности, жесткости, содержания гидрокарбонатов и кальция падают обычно на апрель (табл. 1), т. е. на

начало весеннего половодья. В это время значения σ для электропроводности могут достигать 80—90 мксим/см, в то время как в начале августа и в последующие месяцы вплоть до декабря σ равняется 10—20 мксим/см. Примерно такие же соотношения в изменениях σ в течение года наблюдаются и у других компонентов солевого состава вод водохранилища

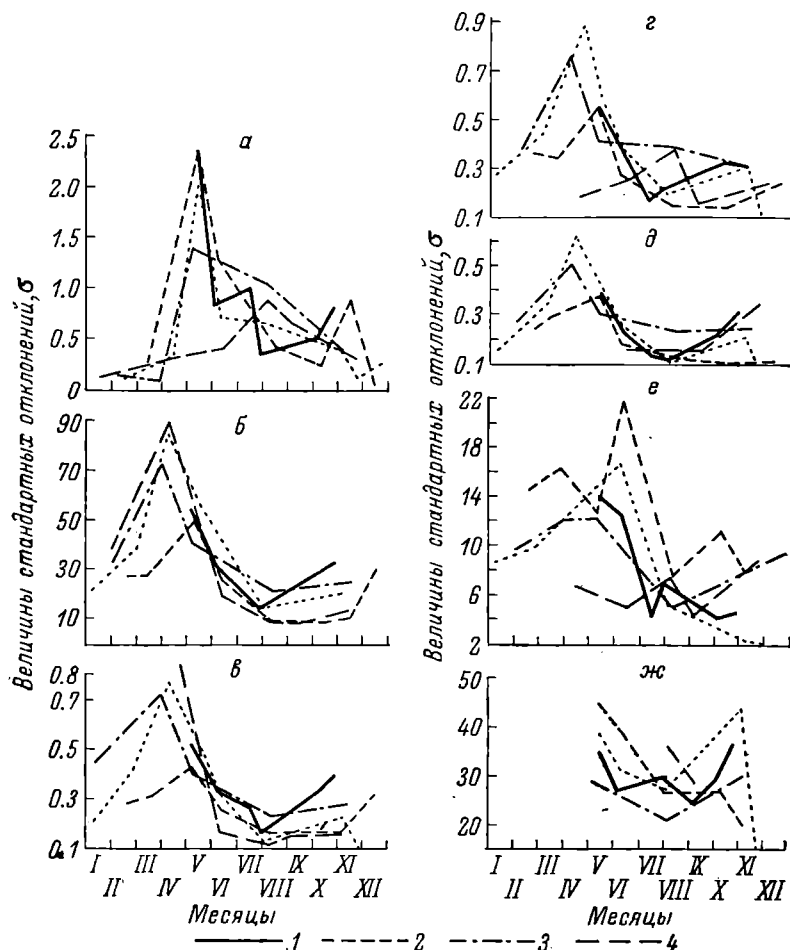


Рис. 4. Сезонный ход стандартных отклонений от средних значений характеристик водной массы Рыбинского водохранилища.

Обозначения те же, что на рис. 2.

(рис. 4). Таким образом, и по солевому составу воды водохранилища наиболее неоднородны в весенний период, особенно в начале весеннего половодья.

Менее четко выражены сезонные изменения σ для прозрачности и цветности воды водохранилища. Данные по прозрачности имеются только за навигационный период, поэтому трудно сказать что-либо определенное о сезонной динамике σ для этой характеристики. Однако есть все основания предполагать, что наибольшая неоднородность вод водохранилища по прозрачности наблюдается также в мае. К августу она уменьшается и вновь увеличивается осенью, вероятно, вследствие осенних паводков. Значения σ для цветности в течение года и от года к году сильно меняются, но максимальные величины приходится на весну и начало лета. Следовательно, и по цветности наибольшая неоднородность вод водоема наблю-

дается во время наполнения его водами половодья. После завершения этого процесса она резко уменьшается (рис. 4).

В связи с изучением изменчивости характеристик во времени и пространстве, а также использованием их для выявления неоднородности вод, наполняющих водохранилище, представляют интерес данные об информативности рассматриваемых параметров. Последнюю можно определить по величине энтропии, которая, будучи мерой априорной неоднородности системы, одновременно характеризует и количество информации, приобретаемой при полном выяснении состояния системы (Вентцель, 1964). В качестве такой системы в нашем случае можно рассматривать всю водную массу Рыбинского водохранилища.

В самом общем виде сезонные изменения энтропии по отдельным характеристикам в среднем за 5 лет характеризуют данные табл. 2. Наибольшей информативностью обладают такие характеристики вод Рыбинского водохранилища, как электропроводность, жесткость, содержание карбонатов и ионов кальция. Температура и особенно цветность являются малоинформативными показателями водных масс, так как большую часть года они однородны по всей акватории водохранилища. Только в периоды наибольшего прогрева (май—июнь) и выхолаживания (сентябрь—октябрь) водоема температура воды может служить достаточно информативным показателем состояния вод водохранилища.

Развивая этот вопрос, целесообразно определить районы водохранилища, в которых значения показателей водной массы наиболее близки к средним значениям соответствующих характеристик по всему водоему. С этой целью для 19 станций синхронных съемок были рассчитаны отклонения от средних по водохранилищу значений температуры, электропроводности и цветности. Затем были вычислены стандартные значения отклонений δ для каждой станции, которые характеризуют соответствие характеристик в рассматриваемой точке их среднему значению по всему водоему (рис. 5).

Из рис. 5, а видно, что из выбранной серии станций температура воды наиболее близка к среднему значению по водохранилищу на ст. 9, 20, 29, 32, 41, 43 и 45.

Таблица 2

Значения энтропии для различных характеристик водных масс по данным синхронных съемок 1960—1964 гг.¹

Характеристика	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Среднее
Температура	0.96	0.93	1.24	1.25	1.77	1.74	1.68	1.36	1.58	1.61	1.40	0.71	1.35
Цветность	1.07	1.39	1.47	1.17	1.34	1.37	1.06	1.01	1.61	0.92	0.84	1.05	1.41
Электропроводность	1.56	1.53	1.65	1.56	1.85	1.87	1.78	1.60	1.31	1.47	1.18	1.19	1.52
Содержание карбонатов	1.34	1.43	1.73	1.57	1.86	1.85	1.70	1.46	1.08	1.17	1.38	1.43	1.50
Содержание ионов кальция	1.49	1.56	1.75	1.56	1.87	1.78	1.58	1.70	1.76	1.54	1.38	1.36	1.61
Жесткость	1.54	1.63	1.77	1.72	1.85	1.78	1.82	1.44	1.32	1.52	1.48	1.39	1.60

¹ Средние значения для прозрачности не рассчитывались, поскольку измерения ее выполнялись только в навигационный период.

Наибольшие же отличия ее от среднего значения наблюдаются на ст. 2, 3, 13, 14, 21, 24, 25, 28, 38 и 42. Аналогичный характер связи стандартного отклонения δ для рассматриваемых станций со средней по водохранилищу величиной наблюдается и у электропроводности (рис. 5, б). Электропроводность, как и температура воды, наиболее близка к средней величине по водохранилищу на ст. 9.

В отличие от этих 2 характеристик изменения цветности по акватории водохранилища имеют несколько иную картину (рис. 5, в). Ее значения близки к среднему по водоему на значительно большем количестве станций. Наиболее хорошее совпадение их имеет место на ст. 9, 21, 28, 32,

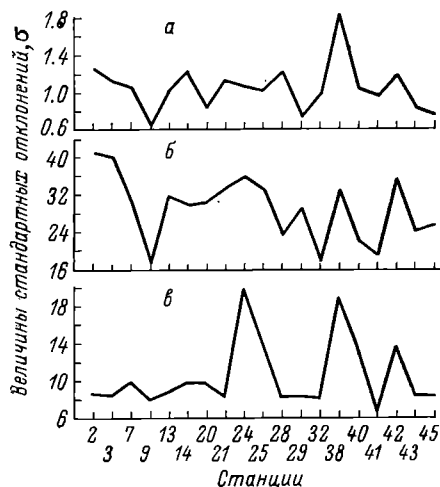


Рис. 5. Величины стандартных отклонений характеристик водной массы на различных станциях от их средних значений по всему водохранилищу.

а — температура; б — электропроводность; в — цветность.

41, 43 и 45, а наибольшие различия — на ст. 24, 25, 38, 40 и 42, т. е. почти на тех же станциях, что и для предыдущих характеристик. Резкое различие в значениях δ для цветности от значений δ для температуры и электропроводности наблюдается лишь на ст. 2 и 3. На этих станциях температура и электропроводность отличаются большими значениями δ и, следовательно, далеки от средних по водохранилищу величин, тогда как цветность, наоборот, характеризуется малыми значениями δ , что указывает на близость цветности воды этого района к средней по водохранилищу. Кроме того, в распределении цветности выделяются участки с резким отклонением ее от средней величины по водоему. Это прежде всего наблюдается в районе ст. 24, 25, 38 и 40. Интересно отметить, что ст. 38 является аномальной по отношению к средним значениям по водоему не только для

цветности, но также для температуры и электропроводности (рис. 5).

Таким образом, анализ изменчивости температуры, электропроводности и цветности воды по акватории Рыбинского водохранилища показал, что районы с наибольшими значениями стандартных отклонений δ рассматриваемых характеристик расположены преимущественно в местах впадения крупных рек. По температуре и электропроводности это четко прослеживается не только на примере Волги (ст. 2, 3), Мологи (ст. 38, 42) и Шексны (ст. 24, 25), но и предустьевого участка рек Согожи и Ухры (ст. 13, 14, 21). По цветности особенно резко выделяются районы выхода в открытую часть водохранилища шекснинского (ст. 24, 25) и моложского (ст. 38, 40) потоков. И, наоборот, наибольшее соответствие измеренных и средних значений указанных характеристик наблюдается на станциях открытой части водохранилища.

Наиболее репрезентативной для определения среднего значения всех 3 характеристик по всему водохранилищу можно считать ст. 9, которая расположена недалеко от центра водохранилища (рис. 1). Однако точность определения средних значений по данным измерений на этой станции будет невелика. Так, среднее значение температуры воды с 95%-й обеспеченностью можно определить с точностью $\pm 1.1^\circ$, электропроводности — ± 35 мксим/см, цветности — $\pm 15^\circ$.

Таким образом, на примере распределения температуры, электропроводности и цветности видно, что в Рыбинском водохранилище значения

характеристик вод меняются не только во времени, но и по его акватории. Это свидетельствует о наличии в водоеме вод, неоднородных по своим физическим и химическим свойствам.

Вопросам методики выделения и анализа водных масс Рыбинского водохранилища посвящено большое количество работ, результаты которых обобщены в монографии Н. В. Буторина (1969). Основным результатом исследований является доказательство наличия в водохранилище 2 принципиально различных разновидностей вод — речных и водной

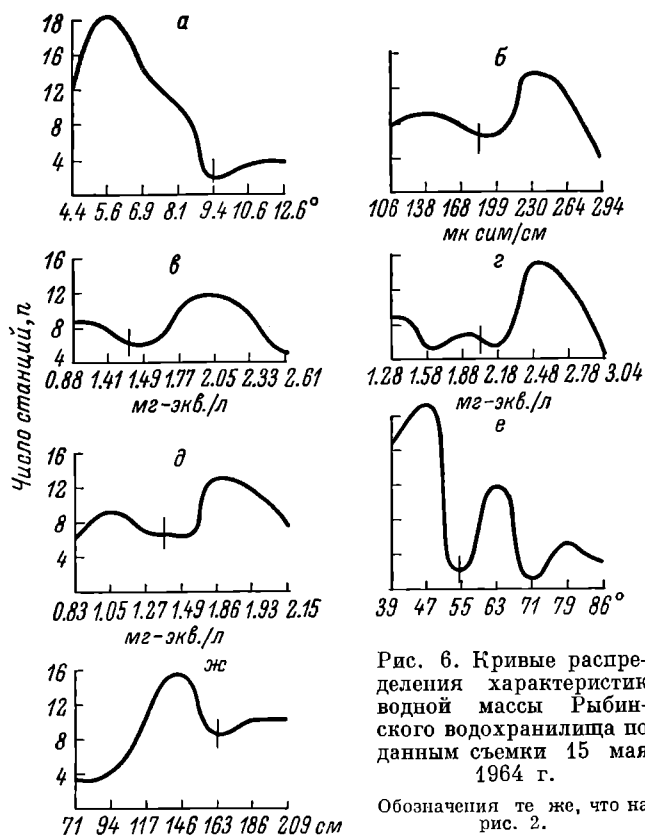


Рис. 6. Кривые распределения характеристик водной массы Рыбинского водохранилища по данным съемки 15 мая 1964 г.

Обозначения те же, что на рис. 2.

массы собственно водохранилища. Данный вывод легко подтверждается при исследовании изменчивости физических и химических характеристик водных масс водохранилища.

Действительно, наличие различных по своим свойствам водных масс в Рыбинском водохранилище обнаруживается уже при анализе кривых распределения отдельных характеристик. В качестве примера воспользуемся результатами синхронной съемки водоема, выполненной 15 мая 1964 г. По данным измерений на 60 станциях получены кривые распределения основных характеристик вод водохранилища (рис. 6). Они показывают, что распределение характеристик далеко от нормального. В ходе кривых, как правило, имеются 2 максимума, а для цветности — даже 3. Такой характер распределения характеристик указывает на наличие в водоеме специфически разнородных водных масс.

В данном случае выделение водных масс наиболее целесообразно по точкам перегиба кривой распределения, как это показано на рис. 6. Такой прием позволяет наметить границы водных масс по каждой ис-

пользуемой характеристике. Последующий анализ положений станций, измеренные свойства вод которых попадают в тот или иной выбранный интервал кривой распределения, позволяют определить репрезентативность отдельных характеристик.

Выделение водных масс по кривым распределения характеристик показано на рис. 7. По таким характеристикам, как электропроводность, жесткость, содержание карбонатов и ионов кальция, в водохранилище четко намечаются районы, в которых значения перечисленных характеристик намного ниже, чем в центральной части. Эти районы приурочены



Рис. 7. Выделение речных вод (заштрихованная часть) и вод центральной части водохранилища по кривым распределения соответствующих характеристик.

Обозначения те же, что на рис. 2.

обычно к местам впадения в водохранилище крупных рек и заполнены речными водами. Так, электропроводность речных вод в среднем (по наиболее часто встречающимся значениям) составляет 136 мксим/см, жесткость — 1.28 мг-экв./л, содержание гидрокарбонатов — 0.92, ионов кальция — 1.05 мг-экв./л. В то же время водная масса центральной части водохранилища характеризуется следующими средними значениями характеристик: электропроводность — 260 мксим/см, жесткость — 2.48 мг-экв./л, содержание гидрокарбонатов — 2.05, ионов кальция — 1.85 мг-экв./л. Таким образом, в водной массе собственно водохранилища средние значения указанных характеристик почти в 2 раза превышают таковые речных вод.

Интересно отметить, что границы речных вод по электропроводности и некоторым компонентам солевого состава в рассматриваемом случае хорошо согласуются с их положением, определенным другими методами (Буторин, 1969). Кроме того, они хорошо соответствуют разделению вод по цветности (рис. 7, е), с той лишь разницей, что второму максимуму распределения цветности соответствуют волжские воды, в которых она равна примерно 60—65°, а третьему — воды Мологи и Шексны, где этот показатель еще выше — около 80°. Цветность же вод центральной части водохранилища равняется 40—50°.

Наименее репрезентативными для выделения водных масс в данном случае оказались температура и прозрачность. По температуре речные воды намечаются лишь в местах впадения в водохранилище рек Мологи, Шексны и Согожи (рис. 7, а), где температура их составляет 11—12°, тогда как в центральной части водоема она не превышает 7°. По прозрачности выделяются воды центральной части водохранилища, примыкающей к приплотинному участку (рис. 7, ж). Средняя прозрачность их на момент съемки была около 200 см, в то время как на остальной акватории водохранилища она не превышала 140 см.

Следовательно, неоднородность водных масс водохранилища четко проявляется и при анализе изменчивости их характеристик. Как было показано ранее (Буторин, 1969), эта особенность связана прежде всего с генезисом вод, наполняющих водохранилище.

В связи с неоднородностью вод возникает вопрос о целесообразности использования различий их физических и химических свойств для районирования водохранилищ. Одной из первых таких попыток является работа М. А. Фортунатова (1959). В основу схемы районирования Рыбинского водохранилища автором положена степень окрашенности вод. Использование свойств водных масс с учетом морфометрических особенностей водоема в некоторой степени повышает объективность в подходе к районированию объекта, но в силу большой сложности и взаимообусловленности природных процессов, протекающих в водохранилищах, предложенный прием остается в значительной степени субъективным.

При районировании водохранилищ весьма желательно использовать одновременно широкий комплекс различных физических и химических характеристик, от которого с помощью математических методов можно перейти к небольшому числу статистических комплексных независимых функций, полученных с учетом взаимосвязи как между исходными признаками, так и с морфометрией водоема.

Для решения такой задачи можно использовать метод разложения на естественные ортогональные составляющие. Суть метода и его применение к ряду задач в метеорологии изложены во многих работах (Багров, 1958; Николаев, 1969; Мещерская и др., 1970). Математические основы метода разложения на естественные составляющие, по Н. А. Багрову (1958), приведены в статье Н. П. Смирнова и О. Ф. Кондрацовой (1972).

Поскольку данный метод требует единой системы станций для измерения рассматриваемых характеристик, то из 33 синхронных съемок водохранилища нами отобрано 22. В каждой из них наблюдения выполнялись на 19 постоянных станциях. Разложению на естественные составляющие подвергались поля всех исследуемых характеристик, за исключением прозрачности. Значения 6 первых собственных чисел ковариационных матриц полей температуры, цветности, электропроводности, гидрокарбонатов, кальция и жесткости, а также их значения в процентах от

$\sum_{j=1}^{19} \lambda_j$, представляющей дисперсию исходного поля и точность (в процентах) представления полей суммой n членов разложения, даны в табл. 3.

Из этой таблицы видно, что первый вектор разложения описывает для всех характеристик более 50% суммарной дисперсии исходного поля, а вместе со вторым — более 70—75%. Для температуры воды первый вектор разложения практически описывает почти всю дисперсию исходного поля и на второй вектор приходится менее 1% дисперсии. Последующие векторы разложения полей цветности, электропроводности и других рассматриваемых характеристик содержат не более 5—7% от общей дисперсии исходных полей. Это свидетельствует об относительной однород-

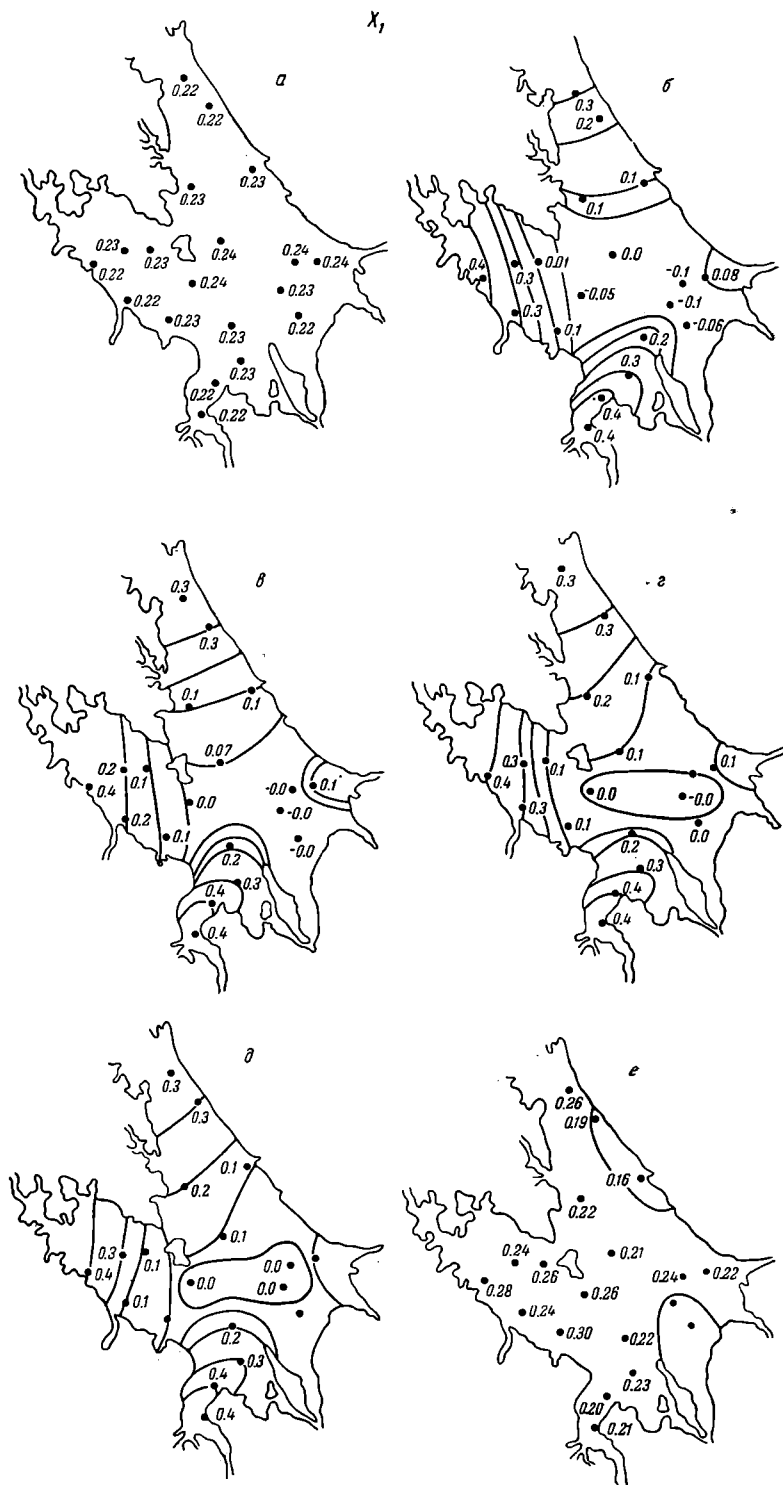


Рис. 8. Поля первого (X_1) и второго (X_2) векторов разложения характеристик водной массы Рыбинского водохранилища.

Обозначения те же, что на рис. 2.

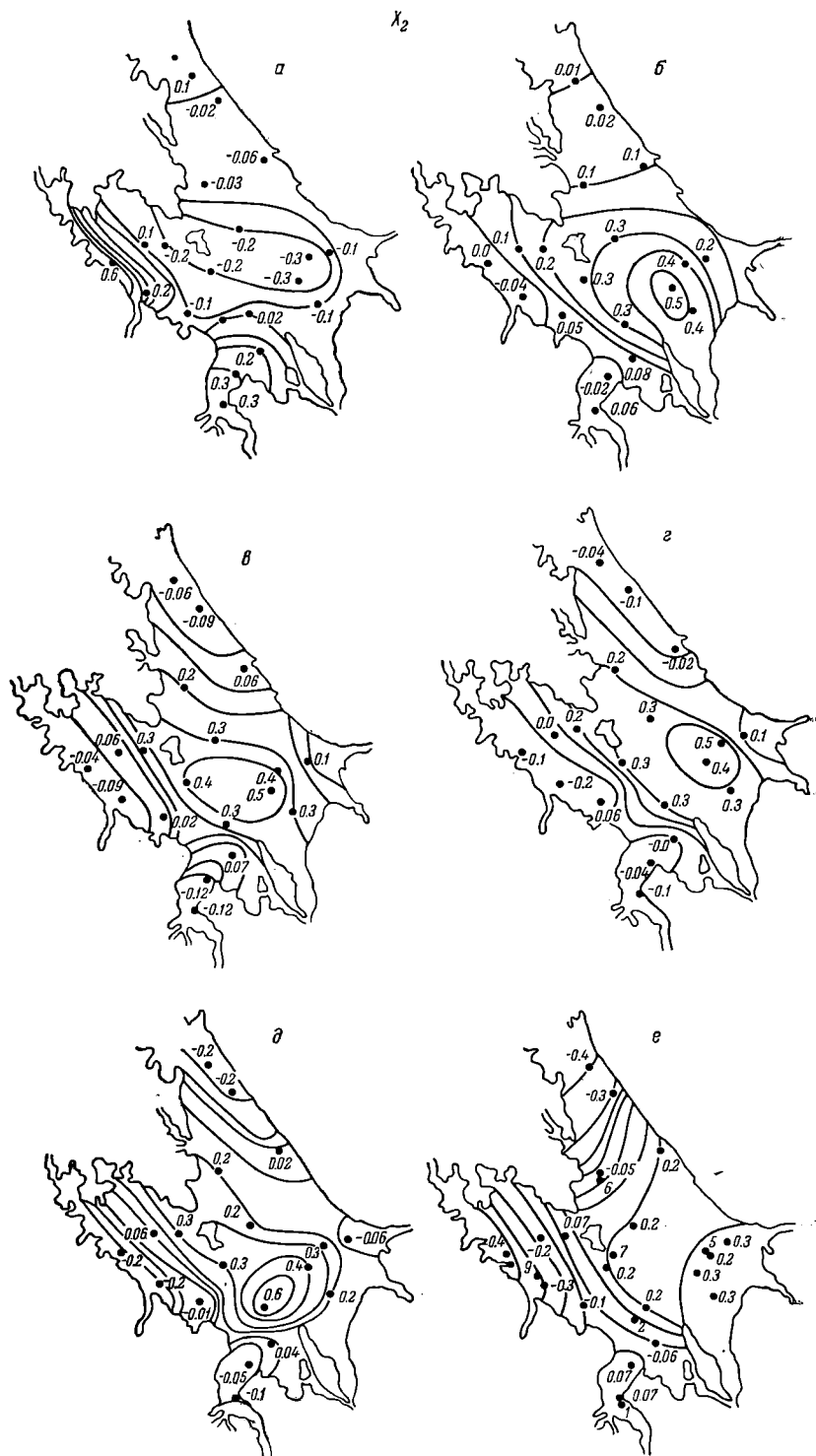


Рис. 8 (продолжение).

Таблица 3

Оценка разложения полей температуры, цветности, электропроводности, содержания карбонатов, кальция и жесткости в Рыбинском водохранилище

j	Температура			Цветность			Электропроводность		
	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{19} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{19} \lambda_j}, \%$	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{19} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{19} \lambda_j}, \%$	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{19} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{19} \lambda_j}, \%$
1	1174	98.4	98.5	1751	53.2	53.2	13801	56.0	56.0
2	7	0.7	99.3	667	20.3	73.5	5656	22.9	78.9
3	5	0.4	99.7	269	8.2	81.7	1783	7.2	86.1
4	2	0.1	99.8	148	4.5	86.2	1321	5.4	91.5
5	1	0.05	99.8	122	3.7	89.9	685	2.7	94.2
6	1	0.05	99.9	87	2.6	92.5	403	1.6	95.8

Таблица 3 (продолжение)

j	Карбонаты			Кальций			Жесткость		
	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{19} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{19} \lambda_j}, \%$	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{19} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{19} \lambda_j}, \%$	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{19} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{19} \lambda_j}, \%$
1	1.43	58.8	58.8	1.07	57.5	57.5	2.49	65.2	65.2
2	0.56	23.1	81.9	0.29	15.5	73.0	0.38	9.9	75.1
3	0.15	6.2	88.1	0.12	6.4	79.0	0.21	5.5	80.6
4	0.08	3.3	91.4	0.10	5.3	84.7	0.17	4.4	85.0
5	0.06	2.5	93.9	0.09	4.8	89.5	0.14	3.7	88.7
6	0.04	1.6	95.4	0.07	3.7	93.2	0.13	3.4	92.1

ности колебаний характеристик в целом по водохранилищу, особенно температуры воды.

Учитывая, что наиболее крупный вклад в общую дисперсию исходных полей всех характеристик вносят 2 первых вектора разложения, рассмотрим поля их распределения по водохранилищу (рис. 8).

Поле первого вектора разложения X_1 для температуры воды (рис. 8, а) имеет очень однородный характер. Это свидетельствует о том, что изменение ее (повышение или понижение) происходит одновременно по всему водохранилищу. Подобный характер распределения значений первого вектора разложения получен и для цветности воды (рис. 8, е).

Поле второго вектора для этих характеристик, наоборот, очень неоднородно (рис. 8, а, е). На участках водоема, примыкающих к местам впадения крупных рек, значения данного вектора оказались максимальными по величине и противоположными по знаку значениям его в центре водохранилища. Так, по температуре воды наиболее существенно выделяются районы, примыкающие к месту впадения в водохранилище рек Мологи и Волги. В первом случае значение второго вектора разложения X_2 равно ± 0.6 , а во втором ± 0.3 , тогда как на ст. 14 и 21, расположенных в центре водохранилища, значения X_2 отрицательны и равны -0.3 . Для верховьевлексинского участка водохранилища значение вектора X_2 оказалось

невелико — всего 0.1. В данном конкретном случае поле второго вектора описывает ту особенность изменения температуры воды в водохранилище, которая связана с ее пониженными или повышенными значениями в районах поступления речных вод по сравнению с водами центра водохранилища. Эта особенность наиболее выражена для вод Мологи и Волги и менее для вод Шексны.

В отличие от температуры воды распределения значений второго вектора разложения X_2 для цветности (рис. 8, е) показывают существенные различия между водами центральной части водохранилища и водами Мологи с Шексной. Если для вод центральной части водоема эта величина в данном случае равна +0.3, то для вод Мологи и Шексны — 0.4. В районе впадения Волги значения X_2 близки к нулю, следовательно, рассматриваемая особенность для вод этого района нехарактерна.

Поля первого и второго векторов разложения для электропроводности и других компонентов солевого состава сходны между собой и заметно отличаются от полей соответствующих векторов температуры и цветности. Так, поле первого вектора разложения X_1 для этих характеристик (рис. 8, б—д) отражает закономерность их изменчивости преимущественно для вод приустьевых участков крупных рек, где значения X_1 достигают +0.4. На станциях же центральной части водоема его значения близки к нулю или имеют небольшие отрицательные величины. Второй вектор разложения, наоборот, отражает изменчивость электропроводности и солевого состава вод центральной части водохранилища. Здесь его значения равны 0.5, в то время как в районах впадения рек в водохранилище они отрицательны и близки к нулю.

Таким образом, поля первого и второго векторов разложения электропроводности, карбонатов, кальция и жесткости показывают, что воды центральной части водохранилища и участков вблизи впадения основных рек обладают не только некоторыми физическими и химическими особенностями, но имеют по существу отличный друг от друга характер изменения характеристик. Это подтверждается разными и по условиям разложения (Багров, 1958), независимыми друг от друга естественными составляющими.

Полученные результаты хорошо согласуются и полностью подтверждают выводы ранее выполненных исследований о наличии в водохранилище существенно различных водных масс. Кроме того, они позволяют произвести районирование водоема по характеру изменчивости физических и химических показателей наполняющих его водных масс.

Действительно, если проанализировать ход нулевых изолиний первого и второго векторов разложения полей электропроводности, карбонатов, кальция и жесткости (рис. 8), то по первому вектору можно легко выделить воды центральной части водохранилища, где его значения отрицательны и близки к нулю, а по второму — воды приустьевых участков водохранилища. Изменчивость значений рассматриваемых характеристик в этих районах будет отражаться только первым (приустьевые участки) или только вторым (центральная часть водохранилища) вектором разложения. Следовательно, с помощью векторов разложения полей характеристик в водохранилище, с одной стороны, выделяются районы речных вод, формирующихся в бассейнах соответствующих рек, а с другой — область специфических вод центральной части, формирующихся в самом водоеме (Буторин, 1969).

Между нулевыми изолиниями на схемах распределения векторов разложения X_1 и X_2 располагаются воды, в изменчивость характеристик которых вносят вклад оба вектора разложения. Следовательно, изменчивость характеристик вод таких участков водохранилища подчиняется закономерностям, которые свойственны как речным водам,

так и водной массе центральной части водоема. Эти участки представляют собой зоны, в которых происходит трансформация речных вод в водную массу центральной части водохранилища (рис. 9).

Важно отметить, что выделенным районам хорошо соответствует и характер распределения по водохранилищу второго вектора разложения полей температуры и цветности (рис. 8, а, е). Его максимальные значения для обоих показателей характерны для станций, расположенных либо в районах речных вод, либо в центральной части водохранилища. Нулевые изолинии и малые по абсолютному значению величины, напротив, свойственны зонам трансформации речных вод.

Таким образом, по характеру изменчивости рассматриваемых физических и химических характеристик вод акватория Рыбинского водохранилища делится на районы с речными водами (волжский, моложский и шекснинский), соответствующие им районы трансформации речных вод и район с водной массой собственно водохранилища (рис. 9).

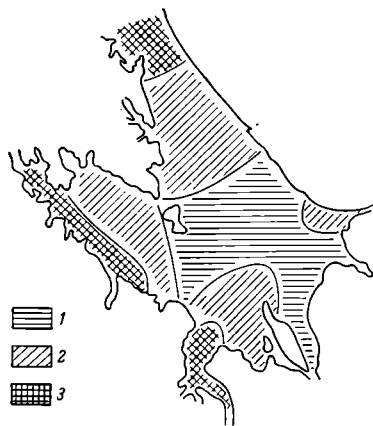


Рис. 9. Схема районирования Рыбинского водохранилища по характеру изменчивости физических и химических характеристик его вод.

1 — район вод центральной части водохранилища; 2 — районы трансформации речных вод; 3 — районы с речными водами.

О закономерностях временной изменчивости характеристик водных масс водохранилища можно судить по изменению значений временных коэффициентов разложения T_1 и T_2 . Предварительно следует напомнить, что в начале данной работы рассматривалась сезонная динамика средних значений характеристик всего объема воды водохранилища. При этом на примере температуры, цветности и электропроводности была определена степень соответствия близости значений указанных характеристик на каждой станции их средним значениям по всему водохранилищу. Результаты показали, что средние значения характеристик по водохранилищу наиболее близки к соответствующим значениям на станциях в зонах трансформации речных вод и существенно отличаются от таковых для речных вод и водной массы центральной части водоема.

Следовательно, сезонная динамика средних значений всех характеристик всего объема воды водохранилища наиболее полно отражает сезонную изменчивость характеристик вод в зонах трансформации. Значения же временных коэффициентов разложения T_1 и T_2 позволяют рассмотреть особенности временной изменчивости характеристик речных вод и вод центральной части водохранилища.

На рис. 10 представлены значения коэффициентов разложения первых двух естественных составляющих. Как и следовало ожидать, в изменениях первого коэффициента разложения T_1 полей температуры отражается сезонный ход ее изменения с максимальными значениями в июле и минимальными в декабре—марте (рис. 10, а). В изменениях второго вектора T_2 также наблюдается определенная закономерность. Как видно из рис. 10, а, в пик половодья температура речных вод, особенно моложских и волжских, должна быть заметно выше, чем вод центральной части водохранилища. Действительно, в мае температура моложской воды в среднем на 6—7°, волжской на 4—5 и шекснинской на 3—4° выше температуры воды на ст. 14, расположенной в центре водохранилища.

На рис. 10 представлены значения коэффициентов разложения первых двух естественных составляющих. Как и следовало ожидать, в изменениях первого коэффициента разложения T_1 полей температуры отражается сезонный ход ее изменения с максимальными значениями в июле и минимальными в декабре—марте (рис. 10, а). В изменениях второго вектора T_2 также наблюдается определенная закономерность. Как видно из рис. 10, а, в пик половодья температура речных вод, особенно моложских и волжских, должна быть заметно выше, чем вод центральной части водохранилища. Действительно, в мае температура моложской воды в среднем на 6—7°, волжской на 4—5 и шекснинской на 3—4° выше температуры воды на ст. 14, расположенной в центре водохранилища.

В ноябре—феврале, наоборот, температура речных вод несколько ниже таковой вод центральной части водоема.

В изменениях временных коэффициентов разложения T_1 и T_2 для полей цветности отсутствуют закономерности, отмеченные для полей

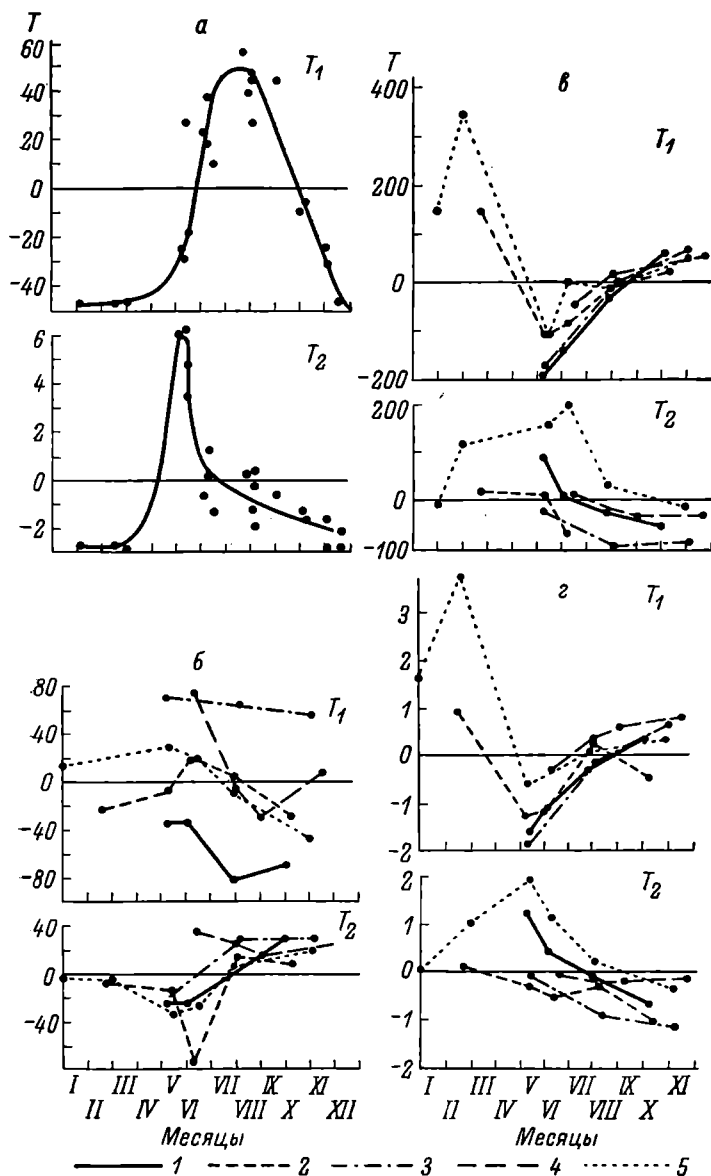


Рис. 10. Сезонный ход первых двух коэффициентов разложения (T_1 и T_2) характеристик водной массы Рыбинского водохранилища.

а — температура; б — цветность; в — электропроводность; г — гидрокарбонаты. Остальные обозначения те же, что на рис. 2.

температуры. В изменениях первого коэффициента для цветности не наблюдается выраженного сезонного года. Можно отметить лишь заметное различие цветности вод в наиболее многоводный за период наблюдений 1962 г., когда она была более высокой, и в маловодный 1960 г., когда

ее показатели оказались самыми низкими. В изменениях второго коэффициента T_2 (рис. 10, б) прослеживаются определенные различия, которые свидетельствуют об особенностях изменчивости цветности речных вод и вод центральной части водохранилища весной (особенно в половодье) по сравнению с летом и осенью. Весной цветность речных вод несколько выше цветности вод центральной части водохранилища, а летом и осенью наблюдается обратная картина.

Наибольший интерес представляет изменчивость временных коэффициентов разложения T_1 и T_2 для полей электропроводности и некоторых компонентов солевого состава (рис. 10, в, г), так как именно по этим характеристикам наиболее четко различаются речные воды и воды центральной части водохранилища. Ход коэффициентов T_1 и T_2 , описывающих изменчивость указанных характеристик различных водных масс, существенно отличается друг от друга.

Из анализа кривых изменчивости этих коэффициентов можно сделать следующие выводы.

Электропроводность речных вод достигает максимальных значений в феврале—марте, после чего происходит резкое уменьшение ее до минимума в мае. Начиная с июня она постепенно повышается и достигает максимальных величин в феврале—марте следующего года. Годовой ход электропроводности вод центральной части водохранилища отличается от рассмотренного. Начиная с декабря—января электропроводность вод этого района постепенно увеличивается и достигает максимума в мае—июне. С июля по сентябрь наблюдается медленное уменьшение ее и в октябре—ноябре отмечается минимум, который заметно ниже соответствующих значений для речных вод.

Наибольшие различия в электропроводности речных вод и вод центральной части водохранилища наблюдаются в мае—июне, когда минерализация речных вод наиболее низкая, а вод центральной части водоема — максимальная. Наименьшие различия в минерализации этих вод характерны для июля—августа.

Ход коэффициентов разложения T_1 и T_2 для других рассматриваемых компонентов солевого состава в общих чертах аналогичен изменениям T_1 и T_2 для электропроводности (рис. 10, е).

Необходимо отметить, что значения коэффициентов разложения T_2 для электропроводности и компонентов солевого состава в разные по водности годы заметно различаются. Эти различия в меньшей степени характерны для изменений коэффициента T_1 . Это значит, что от водности года зависят прежде всего характеристики вод центральной части водохранилища. Действительно, если в маловодный 1964 г. электропроводность в мае на ст. 14 равнялась 280 мксим/см, то в самый многоводный из ряда наблюдений 1962 г. она оказалась на 100 мксим/см ниже и составляла 180 мксим/см. В эти же годы электропроводность волжских вод была почти одинаковой, а ее значения для моложских и шекснинских вод в 1964 г. лишь немного превышали величины 1962 г. Примерно такие же соотношения для разных по водности лет характерны для карбонатов, кальция и жесткости.

Однако в целом изменчивость таких характеристик, как электропроводность, жесткость, содержание ионов кальция, карбонатов, у речных вод заметно выше, чем у вод центральной части водохранилища. Об этом свидетельствует соотношение вкладов первого (описывающего речные воды) и второго (описывающего воды центральной части водохранилища) векторов разложения в общую дисперсию исходных полей указанных характеристик. Это особенно характерно для жесткости вод.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ временной и пространственной изменчивости физических и химических характеристик вод Рыбинского водохранилища еще раз убедительно подтвердил наличие в водоеме водных масс, различных по физическим и химическим свойствам.

Установлены основные закономерности сезонных изменений средних по водохранилищу значений температуры, электропроводности, жесткости, гидрокарбонатов, ионов кальция, цветности и прозрачности. Определена информативность отдельных характеристик и соответствие их значений на различных участках водоема средним величинам по всему водохранилищу. Показана зависимость средних значений характеристик от водности года.

С помощью разложения по естественным ортогональным функциям выявлена особенность изменчивости характеристик речных вод и собственно водохранилища в годовом цикле.

Опыт применения метода разложения по естественным ортогональным функциям для анализа временной и пространственной изменчивости физических и химических характеристик вод Рыбинского водохранилища указывает на возможность использования его при районировании водоемов по комплексу признаков.

ЛИТЕРАТУРА

- Багров Н. А. 1958. Аналитическое представление полей. Тр. Центральн. инст. прогнозов, вып. 64.
- Безлер Ф. И. 1963. Сезонные изменения химических свойств вод Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 5 (8).
- Буторин Н. В. 1965. Синхронные гидрологические съемки на Рыбинском водохранилище. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (10).
- Буторин Н. В. 1966. Сезонное изменение характеристик водных масс и распределение их в Рыбинском водохранилище. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 12 (15).
- Буторин Н. В. 1969. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах волжского каскада. Л.
- Буторин Н. В., Н. П. Смирнов. 1968. Исследование водных масс континентальных водоемов статистическим методом с использованием ЭВМ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 18 (21).
- Вентцель Е. С. 1964. Теория вероятностей. М.
- Зенин А. А. 1965. Гидрохимия Волги и ее водохранилищ. Л.
- Мещерская А. В., Л. В. Руховец, М. И. Юдин, Н. И. Яковлева. 1970. Естественные составляющие метеорологических полей. Л.
- Николаев Ю. В. 1969. Преобразование информации в приложении к задачам гидрометеорологии. Л.
- Смирнов Н. П., О. Ф. Кондрацова. 1972. Исследование многолетних колебаний стока Волги с помощью разложения по естественным составляющим. Наст. сб.
- Фортунатов М. А. 1959. Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатели его режима. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2 (5).
- Щербаков А. П. 1950. Гидрохимический режим Волги, Мологи и Шексны в районе Рыбинского водохранилища (до наполнения водохранилища). Тр. Биол. ст. «Борок», вып. 1.
- Эдельштейн К. К. 1968. Формирование, перемещение и трансформация водных масс Горьковского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 18 (21).

ИССЛЕДОВАНИЯ МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЙ СТОКА ВОЛГИ С ПОМОЩЬЮ РАЗЛОЖЕНИЯ ПО ЕСТЕСТВЕННЫМ СОСТАВЛЯЮЩИМ

В настоящее время при статистическом анализе гидрометеорологических полей широкое распространение получил метод разложения их на естественные составляющие. Этот метод в известном смысле позволяет выделить наиболее существенные черты и закономерности исследуемого процесса (Яковлева, Мещерская, 1965; Мурзин, Смирнов, 1967; Мещерская, Ключевин, 1968; Афанасьева и др., 1968, и др.).

Рассмотрим принципиальные основы этого метода, подробное изложение которого сделано Н. А. Багровым (1958), Е. П. Борисенковым (Борисенков, Романова, 1969), Ю. В. Николаевым (1969) и др.

Пусть мы имеем последовательность полей какого-либо элемента, каждое отдельное поле которого задается значениями этого элемента в некотором ряде дискретных точек $X=1, 2, 3, \dots, n$. Эти точки в пространстве могут выбираться произвольным образом. Тогда рассматриваемая совокупность полей может быть представлена в виде некоторой функции $F(t, x)$, где t — время, принимающее дискретные значения $t=1, 2, 3, \dots, m$.

Представим функцию $F(t, x)$ в виде следующего элементарного разложения:

$$F(t, x) = \sum_h T_h(t) X_h(x), \quad (1)$$

т. е. будем искать разложение совокупности полей по некоторым функциям $X_h(x)$, зависящим только от x . Особенность данного метода разложения состоит в том, что функции $X_h(x)$ заранее нам неизвестны. Эти функции должны быть определены по данным совокупности полей t , свойства и особенности которых определяют нам индивидуальные черты самих исходных функций.

В основу определения неизвестных функций $X_h(x)$, а следовательно и значений $T_h(t)$, закладывается лишь одно условие: чтобы сумма квадратов ошибок разложения (1) по всем точкам данной совокупности достигла минимума

$$\Delta = \sum_t \sum_x \left[F(t, x) - \sum_{h=1}^h T_h(t) X_h(x) \right]^2 = \min. \quad (2)$$

Примем в дальнейшем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} F(t, x) &= F_{ij} \quad (i=1, 2, 3, \dots, m), \\ X_h(x) &= X_{hj} \quad (j=1, 2, 3, \dots, n), \\ T_h(t) &= T_{hi} \quad (h=1, 2, 3, \dots). \end{aligned}$$

При этих обозначениях формула (2) приобретает вид:

$$\Delta = \sum_i \sum_j [F_{ij} - \sum_h T_h X_{hj}]^2. \quad (3)$$

Определим эти функции при $h=1$, опуская для краткости указанный индекс. Раскрывая скобки в выражении (3), получим

$$\Delta = \sum_i \sum_j F_{ij}^2 - 2 \sum_i \sum_j F_{ij} T_i X_j + \sum_i T_i^2 \sum_j X_j^2. \quad (4)$$

Условие минимума Δ запишется в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Delta}{\partial T_i} &= -2 \sum_j F_{ij} X_j + 2 T_i \sum_j X_j^2 = 0, \\ \frac{\partial \Delta}{\partial X_j} &= -2 \sum_i F_{ij} T_i + 2 X_j \sum_i T_i^2 = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Приведенные условия и являются теми уравнениями, из которых мы должны определить неизвестные T_i и X_j . Для нахождения T_i и X_j напомним эту систему в виде:

$$\begin{aligned} \sum_j F_{ij} X_j &= T_i \sum_j X_j^2, \\ \sum_i F_{ij} T_i &= X_j \sum_i T_i^2. \end{aligned} \quad (6)$$

Это есть система $m+n$ уравнений с $m+n$ неизвестными. Из первого уравнения системы (6), меняя для удобства дальнейшего изложения индексы, получим

$$T_i = \frac{\sum_k F_{ik} X_k}{\sum_k X_k^2}. \quad (7)$$

Внеся это уравнение в левую часть второй системы уравнений (6), получим

$$\sum_k X_k \sum_i F_{ij} F_{ik} = X_j \sum_i T_i^2 \sum_k X_k^2. \quad (8)$$

Обозначим

$$\frac{1}{m} \sum_i T_i^2 \sum_j X_j^2 = \lambda, \quad (9)$$

где λ — неопределенный пока множитель, а

$$\frac{1}{m} \sum_i F_{ij} F_{ik} = A_{jk}. \quad (10)$$

Величины A_{jk} есть не что иное, как корреляционные моменты данной последовательности полей для точек $x=j$ и $x=k$.

Совокупность всех этих комбинаций образует квадратную и симметричную ковариационную матрицу:

$$\begin{vmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} \end{vmatrix} \quad (11)$$

Введенные обозначения позволяют написать систему (8) в виде:

$$\sum_k A_{jk} X_k = \lambda X_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

или

[illegible]

Система (13) будет иметь решение, отличное от нуля, в том случае, если ее детерминант равен нулю, т. е.

$$\begin{vmatrix} A_{11} - \lambda & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} - \lambda & \dots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & A_{n2} & \dots & A_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (14)$$

В матричном виде

$$\{A - \lambda E\} = 0, \quad (15)$$

где E — единичная матрица. Уравнение (15) называется характеристическим уравнением данной матрицы $\{A\}$. Оно содержит только одно неизвестное λ .

Если разложить детерминант (14), то это уравнение примет вид обычного алгебраического уравнения:

$$\lambda^n - P_{n-1}\lambda^{n-1} - P_{n-2}\lambda^{n-2} - \dots - P_1\lambda - P_0 = 0. \quad (16)$$

Это уравнение будет иметь n решений

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n,$$

которые называются собственными (характеристическими) числами матрицы $\{A\}$. Таким образом, первый этап задачи разложения полей по естественным составляющим сводится к вычислению ковариационной матрицы $\{A\}$ и нахождению ее собственных чисел, которые будем располагать в убывающем порядке. В силу симметричности матрицы $\{A\}$ все собственные числа действительны и положительно определены. Следовательно, система (12) имеет n решений, соответствующих собственным числам $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Возвращаясь к двойной индексации при X и T , получим следующие n решений:

$$\begin{array}{l} X_{11}X_{12}\dots X_{1n} \text{ (для } \lambda_1) \\ X_{21}X_{22}\dots X_{2n} \text{ (для } \lambda_2) \\ \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \quad \cdot \\ X_{m1}X_{m2}\dots X_{mn} \text{ (для } \lambda_n) \end{array}$$

Каждое из этих решений называется собственным вектором ковариационной матрицы $\{A\}$. Для каждого собственного вектора $X_h(x)$ можно определить соответствующую ему функцию времени $T_h(t)$ по формуле (7), которую перепишем в следующем виде:

$$T_{hi} = \frac{\sum_k F_{ik} X_{hk}}{\sum_k X_{hk}^2}.$$

Таким образом, мы получили n решений поставленной задачи. Эти n решений можно взять в качестве слагаемых и образовать сумму (1), дающую разложение функции $F(t, x)$.

Из теории матриц следует, что собственные векторы симметричной матрицы образуют ортогональную систему, что очень важно при практических приложениях, т. е.

$$\sum_j X_{hj} X_{gj} = 0 \quad (h \neq g).$$

Функции $T_h(t)$ также ортогональны.

Необходимо отметить, что при $h=n$, т. е. при использовании всех членов разложения, разложение является совершенно точным.

Если, как было уже условлено, числа $\lambda_1, \lambda_2, \dots$ расположены в убывающем порядке, то ясно, что чем больше h -номер слагаемого в формуле (1), тем оно в среднем имеет меньший «вес». Если убывание чисел λ_h идет достаточно быстро, то это позволяет для получения приближенных результатов рассматривать в формуле (1) лишь очень небольшое число слагаемых. Отсюда вытекает основное преимущество метода разложений. Оно состоит в том, что главная информация о состоянии поля во многих точках сосредоточивается в немногих слагаемых, причем эти слагаемые в некотором смысле наилучшим образом отвечают природе рассматриваемых исходных полей.

С точки зрения статистики, разложение на естественные составляющие есть разложение по наиболее часто встречающимся комбинациям, причем наиболее часто встречаются те комбинации, которые обладают большими собственными числами (Багров, 1959).

Опыт применения естественных функций к анализу полей барички и температуры выявил одно их важное свойство, а именно: первые естественные функции (которые вносят наибольший вклад в разложение) характеризуют движения весьма больших пространственных масштабов. По мере увеличения номера функции увеличивается число узловых линий, при переходе через которые функция меняет знак, т. е. функции с большими пространственными номерами описывают сравнительно мелкомасштабные процессы. Это позволило М. И. Юдину (1968) сделать существенный, на наш взгляд, вывод о том, что описание поля метеорологического элемента с помощью естественных составляющих при малых значениях n дает возможность отфильтровать и исключить из рассмотрения малосущественные мелкомасштабные возмущения в поле. Иначе говоря, по мнению М. И. Юдина, ограничение первыми числами ряда в разложении по естественным функциям представляет собой статистический прием фильтрации метеорологических «шумов».

Таким образом, с помощью разложения на естественные составляющие можно выделить и исследовать процессы разного масштаба и прежде всего крупномасштабные, представляющие наибольший интерес, поскольку они являются носителями сравнительно долговременной метеорологической памяти. Кроме того, этот метод позволяет анализировать сопряженность процессов по отдельным территориям, вследствие чего с его помощью можно выделять районы синхронного и асинхронного хода метеорологических элементов, что представляется особенно важным в гидрологических исследованиях.

В целях изучения многолетних колебаний стока в бассейне Волги с помощью разложения по естественным составляющим были отобраны данные по расходам воды на 11 створах с 1920 по 1964 г. (табл. 1). Разложению по естественным составляющим были подвергнуты поля среднегодового стока и отдельно за каждый месяц года.

Данные об используемых рядах по стоку на различных створах
в бассейне Волги

Река — пункт наблюдений	Период наблюдений (число лет)	Площадь водосбора, км ²	Средний расход, м ³ /сек.
Волга — Старица	1891—1965 (75)	21100	125
Волга — Ярославль	1877—1963 (87)	154000	1090
Унька — Макарьев	1896—1965 (70)	18500	158
Волга — Горький	1877—1965 (89)	479000	2780
Ока — Муром	1882—1963 (82)	188000	915
Москва — Звенигород	1892—1965 (74)	5000	32.2
Клязьма — Павловский Посад	1920—1965 (46)	5440	31.1
Кама — Пермь	1881—1964 (84)	169000	1630
Белая — Уфа	1878—1964 (87)	100000	744
Вятка — Вятские Поляны	1920—1964 (45)	124000	828
Волга — Куйбышев	1877—1964 (88)	1200000	7760

Поскольку абсолютные значения расходов на указанных створах различаются между собой на один—два порядка (табл. 1), все значения предварительно нормировались.

Расчеты выполнялись на ЭВМ «Наири» Института биологии внутренних вод АН СССР по программе, составленной Р. М. Шевченко.

Таблица 2

Оценка разложения полей среднегодового стока рек бассейна Волги

j	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$		λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$
1	5.919	53.8	53.8	7	0.212	1.9	95.6
2	1.930	17.6	71.4	8	0.162	1.5	97.1
3	0.891	8.1	79.5	9	0.140	1.3	98.4
4	0.722	6.6	86.1	10	0.138	1.2	99.6
5	0.483	4.4	90.5	11	0.039	0.4	100.0
6	0.358	3.2	93.7				

Анализ результатов начнем с оценки сходимости ряда членов разложения. В табл. 2 даны собственные числа ковариационной матрицы среднегодовых значений расходов на указанных створах, а также их значения в процентах от $\sum_{j=1}^{11} \lambda_j$, представляющей дисперсию исходного поля и точность (в процентах) представления полей суммой n членов разложения.

Как следует из табл. 2, первый член разложения описывает около 54% суммарной дисперсии, на второй приходится около 18%, а на третий — 8%. В сумме первые три члена разложения описывают почти 80% суммарной дисперсии. Это свидетельствует об относительной однородности колебаний стока в целом по бассейну Волги.

Поскольку, как указывалось, помимо разложения полей среднегодовых значений расходов выполнялось разложение полей значений расходов за каждый месяц в отдельности, имеется возможность проследить годовой ход оценок разложения (табл. 3). При этом следует оговорить, что в связи

Оценка разложения полей среднемесячного стока рек бассейна Волги

j	Январь			Февраль			Март		
	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{1}^n \lambda_j}{\sum_{1}^{11} \lambda_j}, \%$	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{1}^n \lambda_j}{\sum_{1}^{11} \lambda_j}, \%$	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{1}^n \lambda_j}{\sum_{1}^{11} \lambda_j}, \%$
1	5.139	46.6	46.6	4.953	45.2	45.2	3.987	36.3	36.3
2	2.151	19.6	66.2	2.071	18.8	64.0	2.615	23.8	60.1
3	1.312	11.9	78.1	1.207	11.0	75.0	1.663	15.1	75.2
4	0.930	8.4	86.5	0.977	8.9	83.9	0.872	7.9	83.1
5	0.481	4.4	90.9	0.615	5.6	89.5	0.580	5.3	88.4
6	0.269	2.4	93.3	0.408	3.7	93.2	0.495	4.5	92.9
7	0.259	2.4	95.7	0.279	2.5	95.7	0.365	3.3	96.2
8	0.193	1.8	97.5	0.234	2.1	97.8	0.216	2.0	98.2
9	0.162	1.5	99.0	0.190	1.7	99.5	0.135	1.2	99.4
10	0.069	0.7	99.7	0.035	0.3	99.8	0.037	0.3	99.7
11	0.029	0.3	100.0	0.024	0.2	100.0	0.030	0.3	100.0

Таблица 3 (продолжение)

j	Апрель			Май			Июнь		
	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{1}^n \lambda_j}{\sum_{1}^{11} \lambda_j}, \%$	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{1}^n \lambda_j}{\sum_{1}^{11} \lambda_j}, \%$	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{1}^n \lambda_j}{\sum_{1}^{11} \lambda_j}, \%$
1	5.664	51.6	51.6	5.748	52.3	52.3	5.017	45.6	45.6
2	2.150	19.6	71.2	1.727	15.7	68.0	2.476	22.5	68.1
3	1.347	12.2	83.4	1.130	10.3	78.3	1.437	13.2	81.3
4	0.482	4.4	87.8	0.842	7.7	86.0	0.598	5.4	86.7
5	0.418	3.8	91.6	0.593	5.4	91.4	0.461	4.2	90.9
6	0.311	2.8	94.4	0.329	3.0	93.4	0.368	3.3	94.2
7	0.223	2.0	96.4	0.201	1.8	95.2	0.209	1.9	96.1
8	0.145	1.3	97.7	0.159	1.4	96.6	0.158	1.4	97.5
9	0.104	0.9	98.6	0.099	0.9	97.5	0.128	1.2	98.7
10	0.085	0.8	99.4	0.085	0.8	98.3	0.118	1.1	99.8
11	0.066	0.6	100.0	0.081	0.7	100.0	0.025	0.2	100.0

с созданием на Волге системы водохранилищ сезонный ход среднемесячных расходов воды, особенно на некоторых створах (например, у Ярославля), заметно изменился, в то время как на величины среднегодового стока создание водохранилищ не оказало заметного воздействия. Поэтому использование среднемесячных расходов для разложения менее равномерно, чем среднегодовых. Результаты разложения полей среднемесячного стока будут в какой-то степени искажены и на основании его можно судить только о самых общих закономерностях изменения сезонного стока во времени. Однако следует отметить, что сама методика разложения по естественным составляющим, т. е. наиболее часто встречающимся комбинациям по всему полю, в значительной степени снижает эффект изменения характера колебаний стока в отдельном пункте. Более того, на всех рассматриваемых створах создание водохранилищ привело лишь к большему или меньшему перераспределению стока в течение года, сохранив общие закономерности его сезонного хода.

Таблица 3 (продолжение)

j	Июль			Август			Сентябрь		
	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$
1	4.372	39.8	39.8	5.163	47.0	47.0	5.418	49.3	49.3
2	2.080	18.9	58.7	1.770	16.1	63.1	2.569	23.4	72.7
3	1.305	11.9	70.6	1.181	10.7	73.8	1.125	10.2	82.9
4	0.987	9.0	79.6	0.922	8.4	82.2	0.723	6.6	89.5
5	0.648	5.9	85.5	0.629	5.7	87.9	0.427	3.9	93.4
6	0.626	5.7	91.2	0.517	4.7	92.6	0.238	2.2	95.6
7	0.387	3.5	94.7	0.347	3.2	95.8	0.128	1.1	96.7
8	0.276	2.5	97.2	0.181	1.6	97.4	0.124	1.1	97.8
9	0.145	1.3	98.5	0.122	1.1	98.5	0.108	1.0	98.8
10	0.137	1.2	99.7	0.109	1.0	99.5	0.106	1.0	99.8
11	0.031	0.3	100.0	0.053	0.5	100.0	0.028	0.2	100.0

Таблица 3 (продолжение)

j	Октябрь			Ноябрь			Декабрь		
	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$	λ_j	$\frac{\lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$	$\frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{\sum_{j=1}^{11} \lambda_j}, \%$
1	6.164	56.1	56.1	6.779	61.8	61.8	4.879	44.4	44.4
2	1.979	18.0	74.1	1.738	15.8	77.6	1.909	17.4	61.8
3	0.723	6.6	80.7	0.690	6.3	83.9	1.451	13.2	75.0
4	0.621	5.7	86.4	0.686	6.2	90.1	0.967	8.8	83.8
5	0.500	4.5	90.9	0.374	3.4	93.5	0.473	4.3	88.1
6	0.370	3.4	94.3	0.202	1.8	95.3	0.449	4.0	92.1
7	0.259	2.3	96.6	0.195	1.8	97.1	0.308	2.8	94.9
8	0.159	1.4	98.0	0.115	1.0	98.1	0.238	2.1	97.0
9	0.140	1.3	99.3	0.105	1.0	99.1	0.164	1.5	98.5
10	0.060	0.5	99.8	0.071	0.6	99.7	0.084	0.8	99.3
11	0.021	0.2	100.0	0.038	0.3	100.0	0.074	0.7	100.0

Возвращаясь к табл. 3, можно отметить, что скорость сходимости ряда членов разложения, как и вклад отдельных векторов в общую дисперсию поля, имеет закономерные изменения в течение года. На рис. 1 представлен сезонный ход значений первых трех собственных чисел и суммы первых трех членов разложения. Как видно из этого рисунка, сток Волги наиболее однороден по всему бассейну осенью (октябрь—ноябрь) и весной (апрель—май). В сумме первые три вектора разложения составляют более 80% в апреле—июне и сентябре—ноябре и равны или менее 75% в феврале—марте и июле—августе. Больше всего изменяется в течение года вклад первого вектора разложения в общую дисперсию поля. Так, если в ноябре λ_1 составляет 62%, то в марте — всего лишь 36%. Весной (апрель—май) эта величина равна примерно 52%, а в июле — 40%. Это свидетельствует о том, что наиболее однородные условия, формирующие сток в бассейне Волги, наблюдаются осенью, менее однородные — весной—

в начале лета и наиболее разнородные — в период летней и особенно зимней межени. Такой результат можно трактовать следующим образом. В период летней и зимней межени, когда основное питание рек осуществляется за счет грунтовых вод, большое значение приобретает весь комплекс физико-географических условий в бассейне каждой отдельно взятой реки. В то же время в период весеннего половодья и особенно осенних паводков роль местных физико-географических факторов в формировании стока значительно ослабевает, отчего характер колебаний стока из года в год по всему бассейну становится более однородным. В эти периоды в характере колебаний стока еще более проявляется определяющая роль крупномасштабных атмосферных процессов.

Сезонный ход λ_2 и λ_3 выражен значительно слабее. Чтобы более обоснованно судить о характере их сезонного хода, необходимо рассмотреть поля естественных составляющих λ_2 и λ_3 .

На рис. 2. представлены поля X_1 , X_2 и X_3 среднегодового стока по бассейну Волги. Поле первого вектора очень однородно по всей территории, т. е. уменьшение или увеличение стока происходит одновременно на всей территории, при этом величина изменения относительно дисперсии приблизительно одинакова по всему бассейну.

Поле второй естественной функции X_2 показывает закономерное изменение в характере колебаний стока рек бассейна Волги с запада на восток, т. е. наблюдается асинхронность в колебаниях стока рек бассейна Камы по сравнению со стоком бассейна Верхней Волги и Оки. При этом наиболее активной в поле второго собственного вектора является область бассейна р. Белой ($X_2 = -0.53$). Максимальный «вес» с другим знаком имеет бассейн р. Клязьмы (0.34).

В поле третьего вектора X_3 четко выражена закономерность изменения характера стока с севера на юг. Так, если значения X_3 для Верхней Камы и Вятки отрицательны, то для бассейна р. Белой это значение положительно. То же мы наблюдаем и при сравнении значений X_3 для бассейна Верхней Волги (-0.31) и бассейна Оки (0.35).

Полученные результаты позволяют произвести районирование бассейна Волги по характеру колебаний среднегодового стока. Необходимо выделить бассейн Верхней и Средней Волги до впадения Камы и бассейн Камы. Внутри первого из районов следует рассматривать отдельно бассейн Верхней и Средней Волги до г. Горького и бассейн Оки. Во втором районе можно выделить бассейн р. Белой, который по характеру многолетних колебаний среднегодового стока будет несколько отличаться от бассейна Верхней Камы и Вятки.

Необходимо отметить неплохое соответствие полей векторов среднегодового стока X_2 и X_3 распределению некоторых климатических характеристик на европейской территории СССР. Так, поле вектора X_2 хорошо согласуется с характером изменения высоты снежного покрова, увеличивающейся с запада на восток, изменением числа дней в году со средней

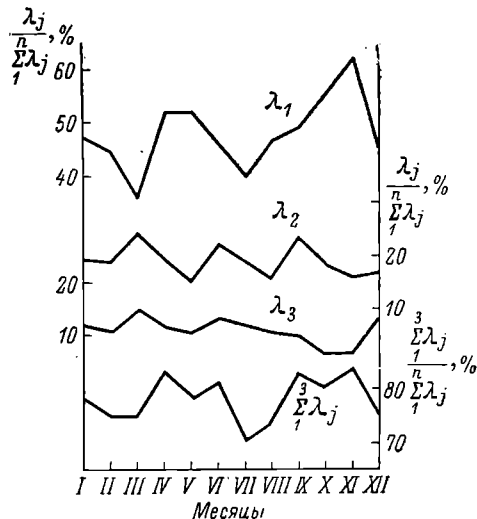


Рис. 1. Сезонные изменения вклада первых трех членов разложения среднемесячного стока в общую дисперсию поля для бассейна Волги.

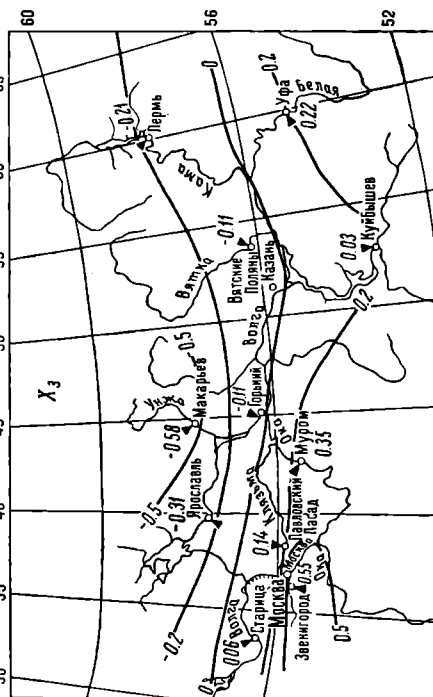
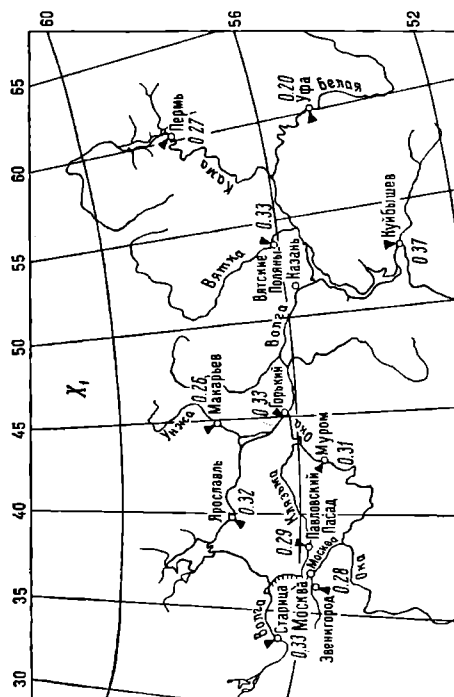
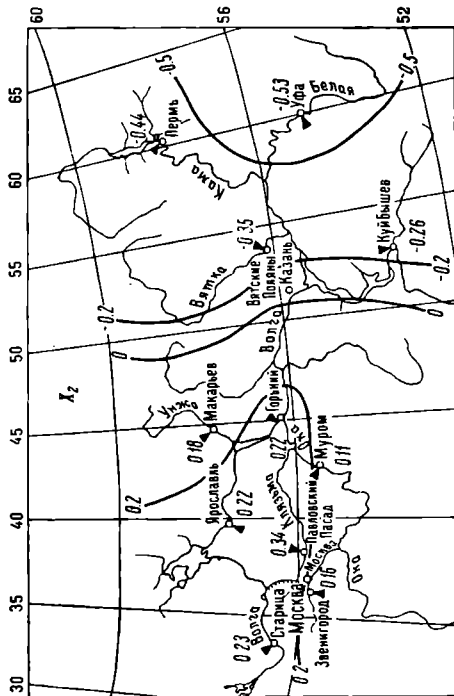


Рис. 2. Поля первых трех собственных векторов разложения среднегодового стока в бассейне Волги.

суточной температурой воздуха ниже -10° и распределением изолиний дат перехода среднесуточной температуры воздуха через 5° весной. Поле вектора X_3 хорошо согласуется с распределением почв и растительности на европейской территории Советского Союза (Атлас СССР, 1962). Все сказанное характерно для среднегодового стока.

Рассмотрим теперь, насколько близки поля первых трех векторов среднегодового стока полям соответствующих векторов среднемесячного стока. На рис. 3 представлен ход коэффициентов корреляции X_1 , X_2 , X_3 среднегодового стока соответственно с X_1 , X_2 и X_3 среднемесячного стока за каждый месяц года. Из этого рисунка следует, что описанный характер колебаний стока в среднем за год формируется в основном в летне-осенние месяцы, примерно с мая по ноябрь.

При этом по третьему вектору даже в мае и ноябре имеет место отличный от среднегодового характер распределения стока. В то же время поле первого вектора в январе и феврале сохраняет общие черты, присущие полю первого вектора среднегодового стока.

На рис. 4 представлены поля первого, второго и третьего векторов разложения в среднем за июнь—октябрь, которые почти точно повторяют картину распределения соответствующих значений векторов разложения среднегодового стока (рис. 2).

Для уточнения моментов перестройки полей стока в течение года были вычислены коэффициенты связи между естественными составляющими среднемесячного стока соседних месяцев (рис. 5). На основании полученных значений тесноты связи между составляющими соседних месяцев можно сделать заключение, что по всем трем составляющим в январе и феврале наблюдается единый характер распределения векторов. Единый характер стока, но отличный от январского и февральского, наблюдается в летние и осенние месяцы, примерно с мая по ноябрь. В то же время по первому и третьему векторам в марте, апреле и декабре характер распределения значений X_1 и X_3 по бассейну резко отличается как от распределения соответствующих значений X_1 и X_3 в январе—феврале, так и от их распределения в летние и осенние месяцы. Следовательно, есть основание считать, что в марте—апреле происходит переход от общих закономерностей, присущих зимнему стоку рек бассейна Волги, к закономерностям летне-осеннего стока, а в декабре наоборот.

Рассмотрим прежде всего отличия первого вектора разложения в марте и апреле от первого вектора среднегодового стока. Из сравнения рис. 2, 4 и 6 можно сделать вывод, что характер распределения вектора X_1 по бассейну Волги в январе—феврале мало отличается от его распределения при разложении среднегодового стока или стока летне-осенних месяцев. В то же время и характер распределения значений X_1 по бассейну Волги в марте и апреле значительно менее однороден по сравнению с среднегодовым стоком (рис. 6). Значения X_1 для Верхней Камы и р. Белой заметно возрастают, в то время как в районе Верхней Волги и Оки падают. Иными словами, активность области бассейна Камы в поле первого вектора значительно повышается при заметном снижении активности бассейна Верхней Волги и Оки. По-видимому, это связано с различными условиями сне-

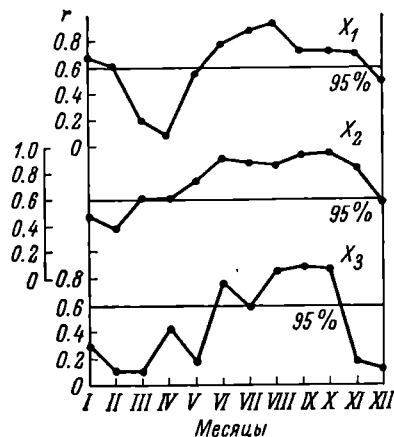


Рис. 3. Коэффициенты корреляции первых трех векторов разложения среднегодового стока с соответствующими векторами разложения среднемесячного стока Волги.

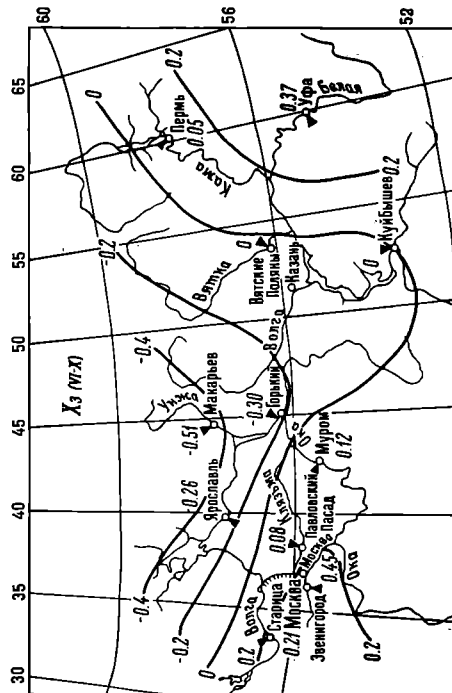
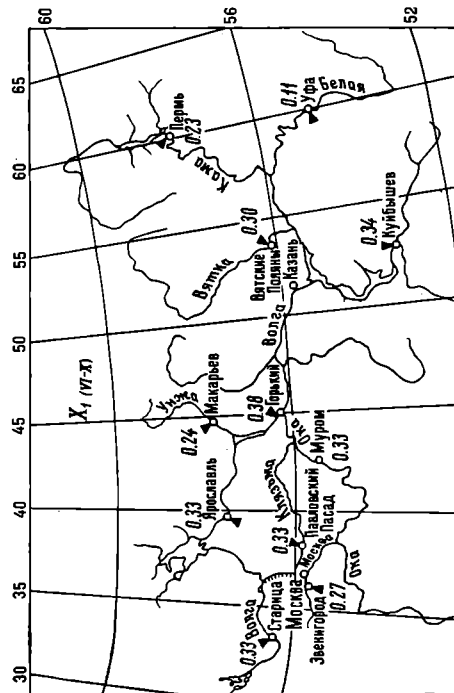
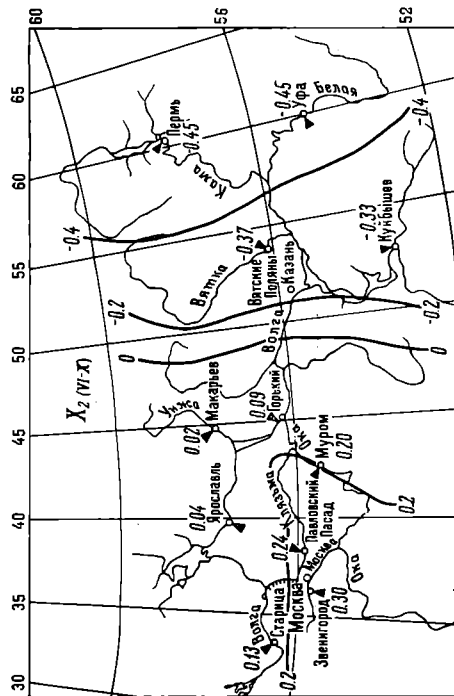


Рис. 4. Поля первых трех собственных векторов разложения стока Волги в среднем за июнь—октябрь.

Коэффициенты корреляции между естественными составляющими среднегодового и среднемесячного стока для бассейна Волги

Среднегодо- вой сток	Среднемесячный сток											
	X_{2I}	X_{2II}	X_{2III}	X_{2IV}	X_{2V}	X_{2VI}	X_{2VII}	X_{2VIII}	X_{2IX}	X_{2X}	X_{2XI}	X_{2XII}
X_3	0.22	0.08	0.64	0.57	0.41	0.34	0.36	0.35	0.24	0.14	0.53	0.69
X_4	0.40	0.32	0.34	0.37	0.49	0.28	0.38	0.31	0.32	0.21	0.20	0.31
X_5	0.72	0.83	0.00	0.12	0.20	0.04	0.03	0.21	0.20	0.10	0.03	0.06
	X_{3I}	X_{3II}	X_{3III}	X_{3IV}	X_{3V}	X_{3VI}	X_{3VII}	X_{3VIII}	X_{3IX}	X_{3X}	X_{3XI}	X_{3XII}
X_2	0.71	0.75	0.22	0.66	0.53	0.33	0.41	0.26	0.25	0.12	0.10	0.15
X_4	0.14	0.32	0.28	0.20	0.06	0.02	0.19	0.15	0.16	0.11	0.15	0.34
X_5	0.45	0.22	0.80	0.38	0.50	0.20	0.10	0.20	0.04	0.38	0.75	0.88

гонакопления в указанных областях, которые наиболее заметно проявляются в первые весенние месяцы.

Чтобы выяснить, какого рода перестройки в характере колебаний стока по бассейну происходят от января—февраля к летне-осенним месяцам в поле второго и третьего векторов, были вычислены коэффициенты корреляции между среднемесячными полями X_2 и X_3 и естественными составляющими среднегодового стока X_2 , X_3 , X_4 , X_5 по схеме, как это представлено в табл. 4.

Полученные результаты представляют большой интерес. Как следует из этой таблицы, от летне-осеннего периода к зимнему и от зимнего к летнему происходит заметная перестройка закономерностей стока по бассейну. Так, пятый по порядку вектор X_5 среднегодового стока, занимающий указанное положение и в летне-осенние месяцы и составляющий в этот период всего 4—6% от общей дисперсии поля, в ноябре по своему вкладу в общую дисперсию поля перемещается уже на третье место, а в декабре составляет 13% от общей дисперсии. В январе—феврале $X_{5\text{ср. год.}}$ уже является вторым по своей значимости вектором и составляет 18—20% от общей дисперсии поля. В марте его значение падает и он перемещается на третье место (15% от общей дисперсии). Начиная с апреля его роль в общей изменчивости стока уже незначительна. В то же время вектор X_2 среднегодового стока в январе—феврале занимает лишь третье место и соответствует векторам X_{3I} и X_{3II} . Роль вектора $X_{4\text{ср. год.}}$ в течение года не становится сколько-нибудь заметной.

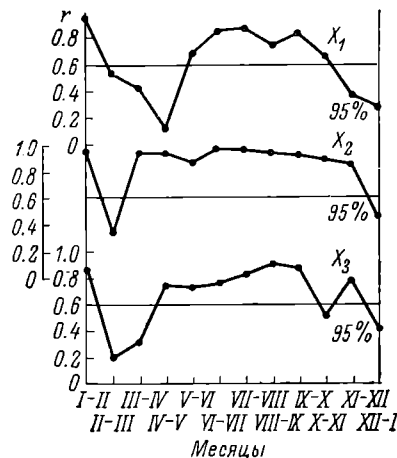


Рис. 5. Коэффициенты корреляции первых трех векторов разложения среднемесячного стока Волги соседних месяцев.

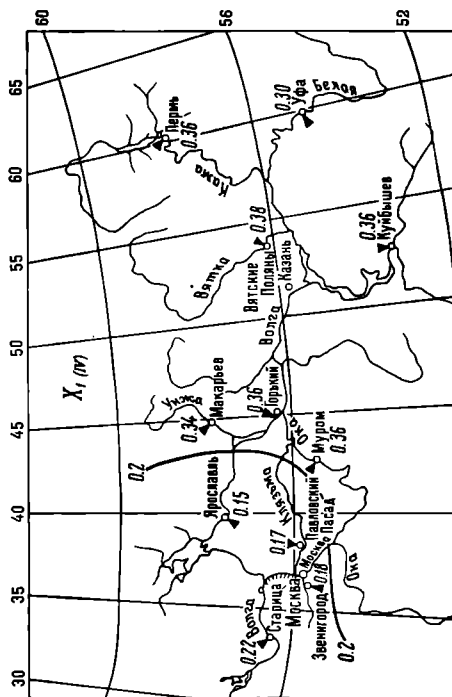
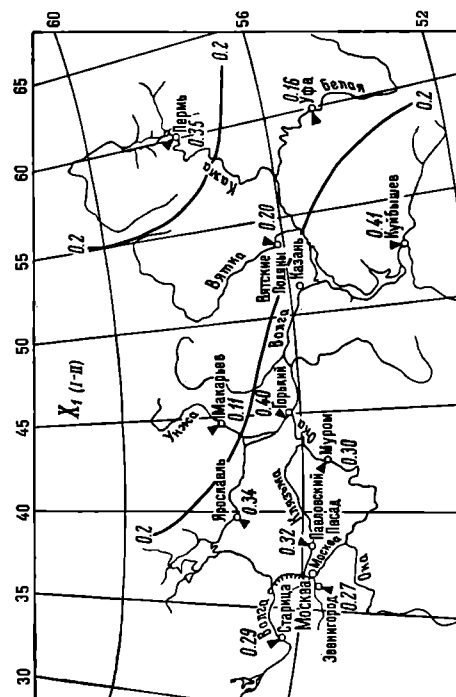
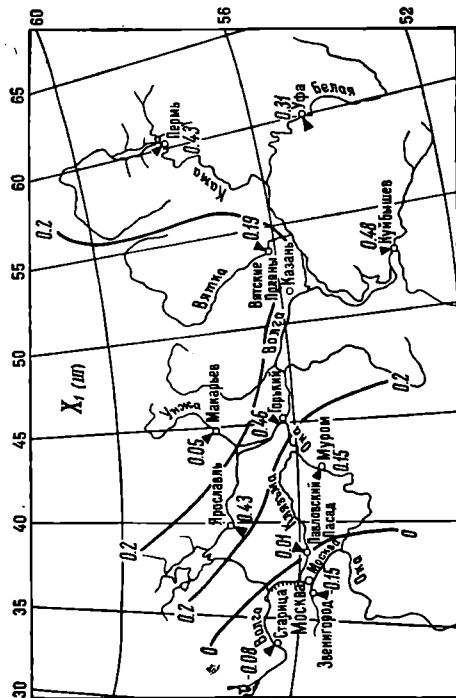


Рис. 6. Поля первого собственного вектора разложения среднемесячного стока Волги в среднем за январь — февраль, март и апрель.

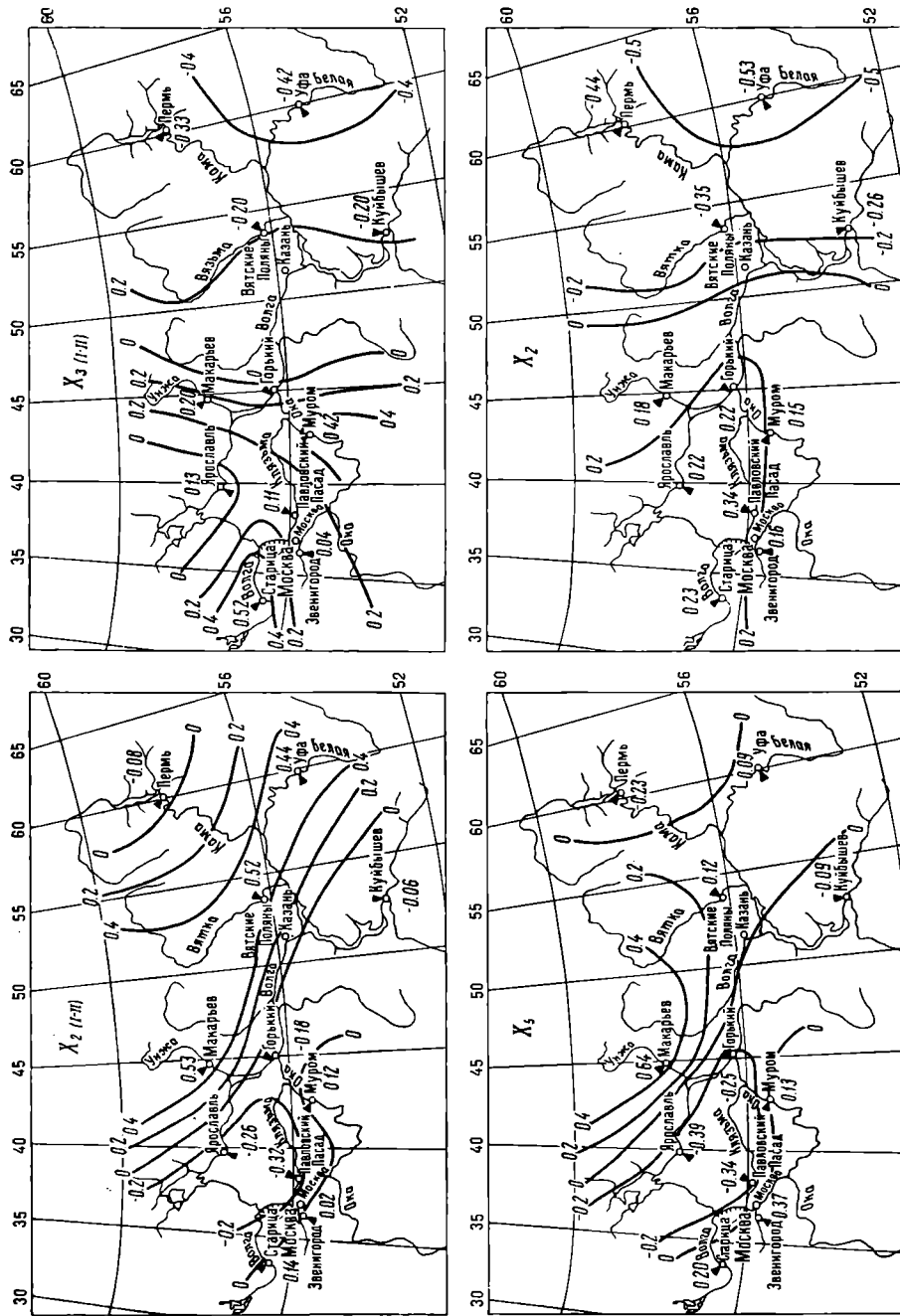
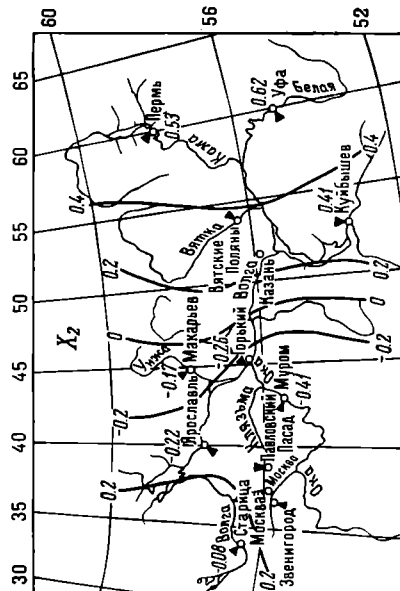
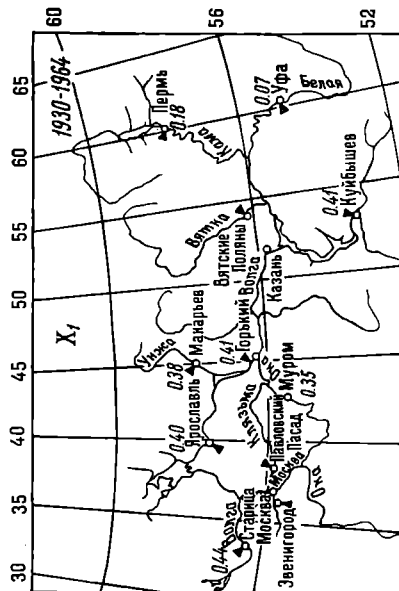
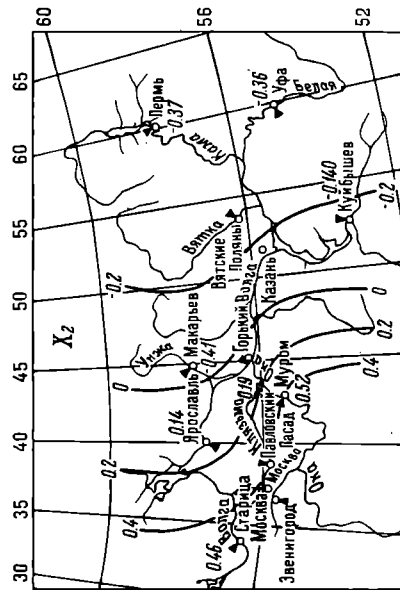
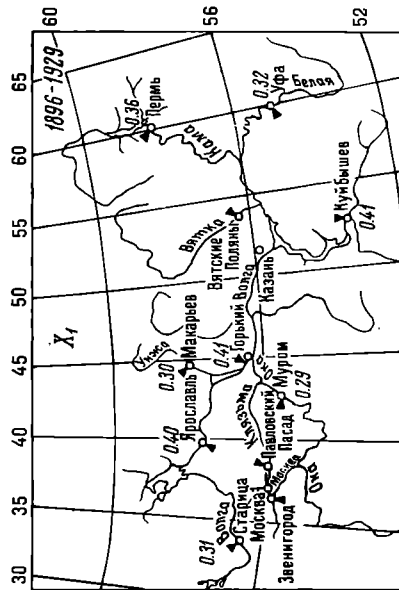
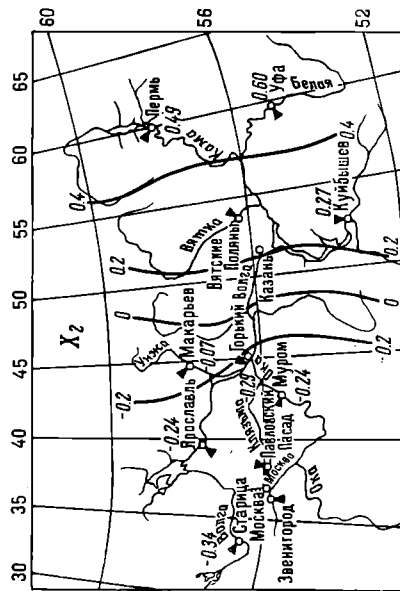
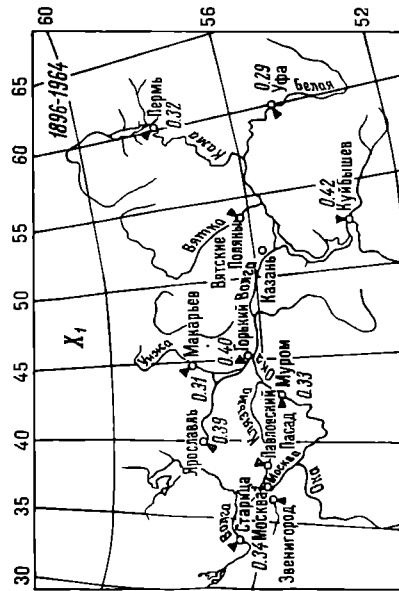


Рис. 7. Поля второго и третьего векторов разложения среднего месячного стока Волги в среднем за январь и февраль в сопоставлении с пятым и вторым векторами разложения среднего доводного стока.



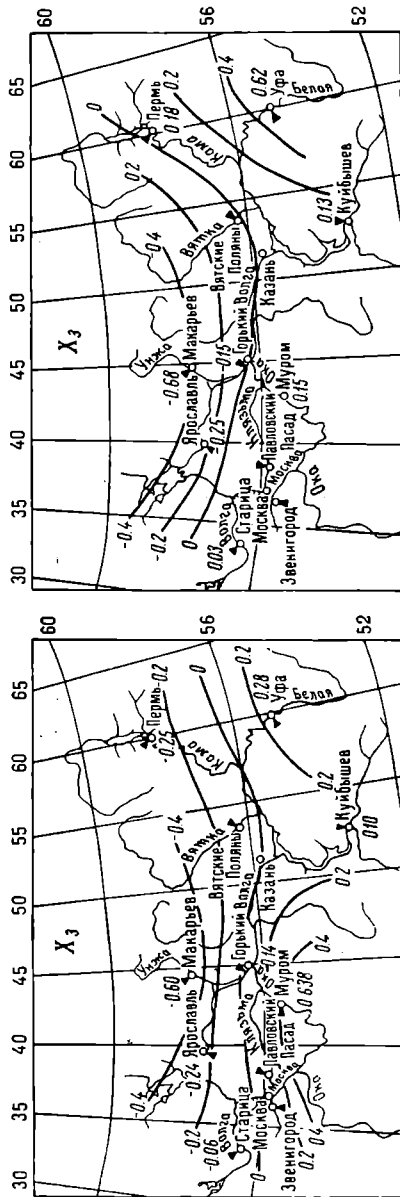
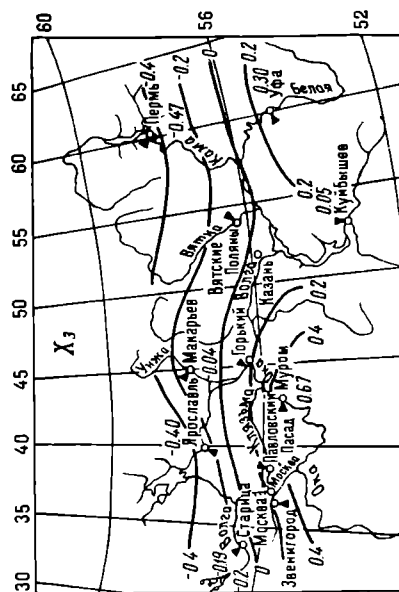


Рис. 8. Поля первых трех собственных векторов разложения среднегодового стока в бассейне Волги для периодов 1896—1964, 1896—1929 и 1930—1964 гг.



Таким образом, основная перестройка полей стока в январе—феврале заключается в значительном усилении роли пятого вектора среднегодового стока, который в эти месяцы, будучи вторым по порядку, составляет около 20% от общей дисперсии поля.

На рис. 7 представлены для сравнения поле вектора X_5 среднегодового стока и среднее за январь—февраль поле вектора X_2 и поле вектора X_3 среднегодового стока и среднее за январь—февраль поле вектора X_3 . Как следует из приведенного рисунка, поля сравниваемых векторов действительно аналогичны друг другу.

Выполненный анализ сезонных различий полей трех векторов разложения неизбежно приводит к вопросу об устойчивости естественных ортогональных функций.

Из самой сущности этого метода следует, что он является статистическим, и, следовательно, возникает вопрос, насколько полученные естественные функции координат являются устойчивыми в зависимости от характера статистического материала. От ответа на этот вопрос зависит степень практической ценности метода (Мещерская и др., 1970).

Устойчивость разложения, видимо, следует проверять исходя из следующих соображений. Гидрометеорологическая информация на каждой станции отражает наряду с процессами крупного масштаба местные особенности станций. Соотношение этих частей информации на различных станциях различно, вследствие чего не все районы одинаково значимы при формировании первых и последующих ортогональных функций. Отсюда вытекает вывод, что на форме этих функций должны сказаться характер и густота используемой сети станций. При этом общие соображения позволяют предположить, что более чувствительными к изменению сети станций должны быть те естественные составляющие, которые описывают мелкомасштабные свойства полей, т. е. младшие естественные компоненты. Если при этом старшие естественные компоненты не изменят своей формы, то, следовательно, основные колебания устойчивы при изменении системы и густоты точек (Мещерская и др., 1970). Кроме того, форма естественных составляющих может изменяться во времени. Если такие изменения очень заметны, то эффективность рассматриваемого метода будет невысока.

Исследования барического поля, температурных полей и некоторых других климатических характеристик показали достаточную устойчивость формы главных естественных составляющих как во времени, так и при изменении системы или густоты точек.

Рассмотрим, насколько устойчивы естественные составляющие разложения стока рек бассейна Волги. Для этого мы исключили из анализа данные по колебаниям стока на трех створах с короткими рядами наблюдений, что позволило увеличить длину исходных рядов по расходам воды на оставшихся восьми створах на 29 лет (табл. 1).

Разложение выполнялось как для всего периода с 1896 по 1964 г., так и для двух отдельно взятых периодов с 1896 по 1929 и с 1930 по 1964 г. Поля первых трех естественных составляющих для указанных разложений представлены на рис. 8.

Как видно из этого рисунка, форма первых трех естественных функций разложения среднегодового стока почти не претерпела никаких изменений при уменьшении числа станций и переходе от одного периода наблюдений к другому, что свидетельствует о большой устойчивости естественных ортогональных функций разложения среднегодового стока по бассейну Волги.

Дополнительным доказательством устойчивости формы естественных ортогональных функций может служить и то, что, несмотря на большие качественные особенности сезонного стока, характер распределения по бассейну векторов X_1 , X_2 , и X_3 (особенно двух первых) сохраняется в большинстве месяцев года.

Рассмотрим теперь ход временных коэффициентов разложения. На рис. 9 представлены коэффициенты разложения первых трех естественных составляющих среднегодового стока рек с 1896 по 1964 г. Предварительное сопоставление данных коэффициентов с соответствующими коэффициентами разложения поля стока, полученными по 11 створам за период с 1920 по 1964 г., показало их полное соответствие.

Для исследования временной структуры изменения коэффициентов T выполненного разложения был использован спектральный анализ с предварительной фильтрацией низкочастотных колебаний. Поскольку длина

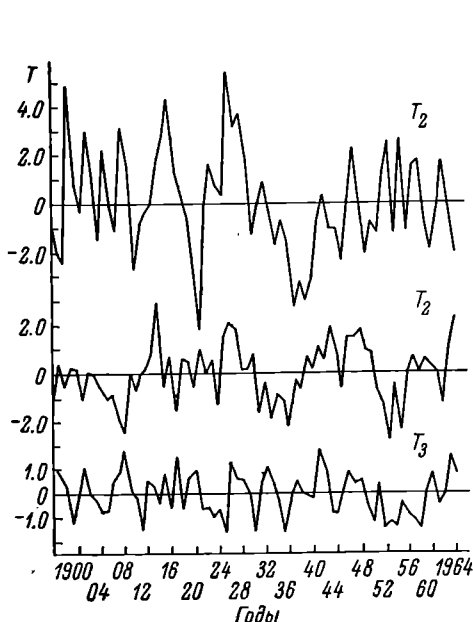


Рис. 9. Временной ход первых трех коэффициентов разложения среднегодового стока Волги.

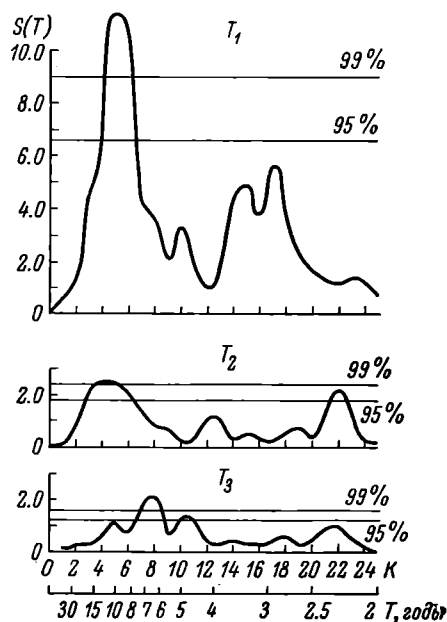


Рис. 10. Спектрограммы первых трех коэффициентов разложения среднегодового стока Волги.

исследуемого ряда ограничена 69 членами, спектральная плотность исследовалась только в пределах 2—15 лет. Для исключения вариаций с большими периодами из среднегодовых значений коэффициентов вычитались 11-летние средние скользящие значения. Спектрограммы полученных таким образом значений первых трех коэффициентов разложения среднегодового стока представлены на рис. 10.

Из рисунка следует, что в ходе коэффициентов первого вектора разложения с вероятностью более 99% имеется вариация с периодом около 10 лет. Кроме указанной на спектре вариации заметно выделяется период около трех лет. Однако вероятность наличия этой вариации в ходе T составляет менее 95%.

В ходе коэффициентов второго вектора заметно выделяются две вариации. Период первой составляет 12—13 лет. Ее вероятность превышает уровень 99%-й обеспеченности. Период второй равен 2.3 года, а амплитуда превышает уровень 95%-й обеспеченности.

Изменения во времени коэффициентов третьего вектора разложения заметно отличаются от первых двух. В этом случае выше 99%-го уровня значимости лежит шести-семилетняя вариация и выше 95%-го уровня — пятилетняя. Учитывая, что указанные периоды близки друг к другу, можно предположить, что изменениям коэффициента T_3 свойственно только одно циклическое колебание с периодом около 5—7 лет.

Следовательно, частотная структура изменения во времени коэффициентов разложения стока рек бассейна Волги хорошо соответствует ранее установленной авторами структуре многолетних колебаний стока, которая была получена при анализе изменчивости расходов воды на отдельных створах (Кондрацова, Смирнов, 1972; Смирнов и др., 1972а, 1972б).

Таким образом, выполненное исследование с помощью разложения полей стока Волги на естественные составляющие позволило сделать ряд выводов о характере временной и пространственной изменчивости стока Волги, его устойчивости и выполнить объективное районирование бассейна по характеру многолетних колебаний стока. Есть все основания считать, что разложение на естественные составляющие может служить объективным методом исследования стока рек отдельных территорий и бассейнов крупных рек. По-видимому, этот метод найдет широкое применение в гидрологических исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

- А т л а с СССР. 1962. ГУГК, М.
- А ф а н а сьева В. Б., Н. П. Е с а ко в а, В. М. Т и т о в. 1968. Статистическое описание полей снежного покрова методом разложения по естественным ортогональным функциям. Тр. ГГО, вып. 201.
- Б а г р о в Н. А. 1959. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих. Тр. Центральн. инст. прогнозов, вып. 64.
- Б о р и с е н к о в Е. П., М. А. Р о м а н о в. 1969. Алгоритмы и программы статистической обработки информации. Л.
- К о н д р а ц о в а О. Ф., Н. П. С м и р н о в. 1972. Двухлетние циклические колебания в стоке Волги. Наст. сб.
- М е щ е р с к а я А. В., Л. Н. К л ю к в и н. 1968. О разложении полей аномалий средней месячной температуры по естественным ортогональным функциям. Тр. ГГО, вып. 201.
- М е щ е р с к а я А. В., Л. В. Р у х о в е ц, М. И. Ю д и н, Н. И. Я к о в л е в а. 1970. Естественные составляющие метеорологических полей. Л.
- М у р з и н А. И., В. И. С м и р н о в. 1967. Опыт использования естественных ортогональных функций как основы численного представления полей сплоченности льда и прогноза его перераспределения. Метеорол. и гидрол., № 11.
- Н и к о л а е в Ю. В. 1969. Преобразование информации в приложении к задачам гидрометеорологии. Л.
- С м и р н о в Н. П., Э. И. С а р у х а н я н и О. Ф. К о н д р а ц о в а. 1972а. О природе семилетней циклическости в многолетних колебаниях стока Волги. Наст. сб.
- С м и р н о в Н. П., Э. И. С а р у х а н я н и О. Ф. К о н д р а ц о в а. 1972б. Солнечно-обусловленные колебания стока Волги. Наст. сб.
- Ю д и н М. И. 1968. Физико-статистический метод долгосрочных прогнозов погоды. Л.
- Я к о в л е в а Н. И., А. В. М е щ е р с к а я. 1965. Анализ барического поля над северным полушарием методом разложения по естественным ортогональным функциям. Тр. ГГО, вып. 168.
-

СОЛНЕЧНООБУСЛОВЛЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СТОКА ВОЛГИ

В предшествующих работах авторами было показано (Кондрацова и др., 1970; Смирнов и др., 1970), что многолетняя изменчивость стока Волги носит сложный многокомпонентный циклический характер и форми-

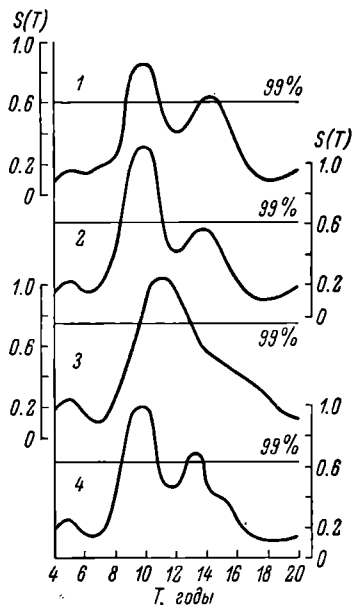


Рис. 1. Спектрограммы значений расходов Волги на створах (фильтр «7-11»).

1 — приток в Рыбинское водохранилище; 2 — сток Волги у Ярославля; 3 — сток Оки у Горбатова; 4 — сток Волги у Горького.

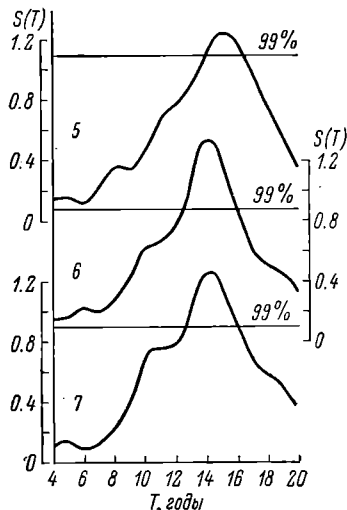


Рис. 2. Спектрограммы значений расходов Волги на створах (фильтр «7-11»).

5 — сток Камы у Перми; 6 — сток Волги у Куйбышева; 7 — сток Волги у Волгограда.

руется под воздействием атмосферных процессов, на ход которых значительное влияние оказывают некоторые геофизические факторы. Так, было установлено, что для многолетнего хода стока Верхней, Средней и Нижней Волги характерна заметная циклическая вариация с периодом 10—14 лет и «вековая» тенденция, которые можно объяснить как солнечнообусловленные. В настоящей статье излагается попытка более подробного изучения

Следовательно, частотная структура изменения во времени коэффициентов разложения стока рек бассейна Волги хорошо соответствует ранее установленной авторами структуре многолетних колебаний стока, которая была получена при анализе изменчивости расходов воды на отдельных створах (Кондрацова, Смирнов, 1972; Смирнов и др., 1972а, 1972б).

Таким образом, выполненное исследование с помощью разложения полей стока Волги на естественные составляющие позволило сделать ряд выводов о характере временной и пространственной изменчивости стока Волги, его устойчивости и выполнить объективное районирование бассейна по характеру многолетних колебаний стока. Есть все основания считать, что разложение на естественные составляющие может служить объективным методом исследования стока рек отдельных территорий и бассейнов крупных рек. По-видимому, этот метод найдет широкое применение в гидрологических исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

- А т л а с СССР. 1962. ГУГК, М.
- А ф а н а с ь е в а В. Б., Н. П. Е с а к о в а, В. М. Т и т о в. 1968. Статистическое описание полей снежного покрова методом разложения по естественным ортогональным функциям. Тр. ГГО, вып. 201.
- Б а г р о в Н. А. 1959. Аналитическое представление последовательности метеорологических полей посредством естественных ортогональных составляющих. Тр. Центральн. инст. прогнозов, вып. 64.
- Б о р и с е н к о в Е. П., М. А. Р о м а н о в. 1969. Алгоритмы и программы статистической обработки информации. Л.
- К о н д р а ц о в а О. Ф., Н. П. С м и р н о в. 1972. Двухлетние циклические колебания в стоке Волги. Наст. сб.
- М е щ е р с к а я А. В., Л. Н. К л ю к в и н. 1968. О разложении полей аномалий средней месячной температуры по естественным ортогональным функциям. Тр. ГГО, вып. 201.
- М е щ е р с к а я А. В., Л. В. Р у х о в е ц, М. И. Ю д и н, Н. И. Я к о в л е в а. 1970. Естественные составляющие метеорологических полей. Л.
- М у р з и н А. И., В. И. С м и р н о в. 1967. Опыт использования естественных ортогональных функций как основы численного представления полей сплоченности льда и прогноза его перераспределения. Метеорол. и гидрол., № 11.
- Н и к о л а е в Ю. В. 1969. Преобразование информации в приложении к задачам гидрометеорологии. Л.
- С м и р н о в Н. П., Э. И. С а р у х а н я н и О. Ф. К о н д р а ц о в а. 1972а. О природе семилетней циклическости в многолетних колебаниях стока Волги. Наст. сб.
- С м и р н о в Н. П., Э. И. С а р у х а н я н и О. Ф. К о н д р а ц о в а. 1972б. Солнечно-обусловленные колебания стока Волги. Наст. сб.
- Ю д и н М. И. 1968. Физико-статистический метод долгосрочных прогнозов погоды. Л.
- Я к о в л е в а Н. И., А. В. М е щ е р с к а я. 1965. Анализ барического поля над северным полушарием методом разложения по естественным ортогональным функциям. Тр. ГГО, вып. 168.
-

СОЛНЕЧНООБУСЛОВЛЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ СТОКА ВОЛГИ

В предшествующих работах авторами было показано (Кондрацова и др., 1970; Смирнов и др., 1970), что многолетняя изменчивость стока Волги носит сложный многокомпонентный циклический характер и форми-

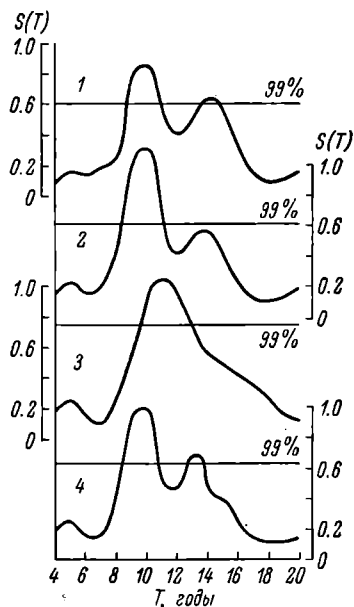


Рис. 1. Спектрограммы значений расходов Волги на створах (фильтр «7-11»).

1 — приток в Рыбинское водохранилище; 2 — сток Волги у Ярославля; 3 — сток Оки у Горбатова; 4 — сток Волги у Горького.

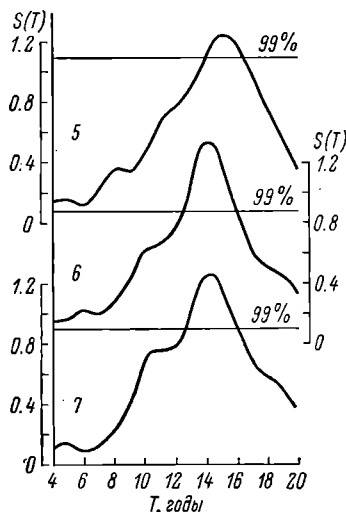


Рис. 2. Спектрограммы значений расходов Волги на створах (фильтр «7-11»).

5 — сток Камы у Перми; 6 — сток Волги у Куйбышева; 7 — сток Волги у Волгограда.

руется под воздействием атмосферных процессов, на ход которых значительное влияние оказывают некоторые геофизические факторы. Так, было установлено, что для многолетнего хода стока Верхней, Средней и Нижней Волги характерна заметная циклическая вариация с периодом 10—14 лет и «вековая» тенденция, которые можно объяснить как солнечнообусловленные. В настоящей статье излагается попытка более подробного изучения

многолетних колебаний стока Волги и их связи через посредство атмосферной циркуляции с изменениями солнечной активности в 11-летнем и «вековом» циклах.

Спектральным анализом рядов по стоку Волги, Оки и Камы, отфильтрованных полосовым фильтром «7-11», было найдено, что в многолетних изменениях притока вод в Рыбинское водохранилище, стока Волги у Ярославля и Горького в диапазоне 9—16 лет присутствуют две циклические вариации с периодами 9—11 и 14 лет, статистическая значимость которых превышает уровень 99%-й обеспеченности (рис. 1). Наряду с этим по результатам спектрального анализа среднегодовых расходов Камы и Волги у Куйбышева и Волгограда в многолетних изменениях стока Камы и Нижней Волги в диапазоне 9—16 лет обнаруживается лишь одна вариация с периодом 14—15 лет (рис. 2).

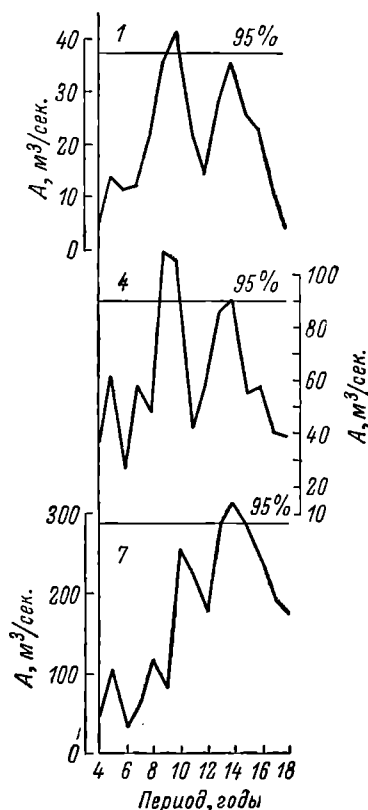


Рис. 3. Периодограммы значений расходов Волги на створах (фильтр «7-11»).

1 — приток в Рыбинское водохранилище; 4 — сток Волги у Горького; 7 — сток Волги у Волгограда.

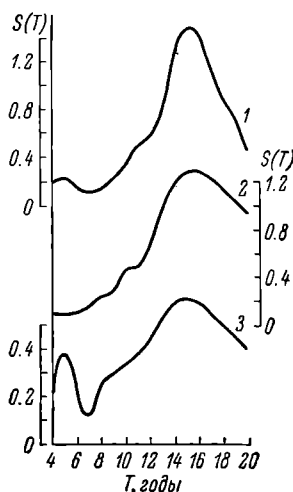


Рис. 4. Спектрограммы значений расходов рек (фильтр «7-11»).

1 — сток Белой у Бирска (1881—1963 гг.); 2 — сток Вятки у Вятских Полян (1914—1963 гг.); 3 — сток Урала у Куйбышева (1915—1964 гг.).

Однако если обратиться к результатам периодограммного анализа указанных рядов, отфильтрованных с применением того же полосового фильтра, то оказывается, что периодограммы многолетних изменений среднегодовых расходов на створах Верхней, Средней и Нижней Волги довольно близки и с вероятностью около 95% указывают на наличие вариации с двумя периодами в 10 и 14 лет (рис. 3). Учитывая высокую избирательную способность периодограммного анализа, можно полагать, что полученные результаты более достоверны и свидетельствуют о присутствии в многолетних колебаниях стока Волги в диапазоне 9—16 лет вариаций с периодами 9—11 и 14 лет. В то же время по результатам спектрального анализа (рис. 1 и 2) можно предполагать, что соотношение амплитуд этих вариаций в стоке различных участков бассейна Волги неодинаково. Так, в стоке

Верхней и Средней Волги рассматриваемые вариации имеют, по-видимому, примерно равные амплитуды, тогда как в стоке Камы и Нижней Волги амплитуда 14—15-летней вариации значительно превышает амплитуду 11-летней. Вследствие этого спектральный анализ в силу своей малой разрешающей способности обнаруживает лишь одно, преобладающее колебание.

Столь крупные 14—15-летние колебания возникают в стоке Нижней Волги, по-видимому, вследствие существования мощной 15-летней вариации в многолетних изменениях стока рек бассейна Камы. Действительно, как показывают результаты спектрального анализа (рис. 4), преобладание 15-летней вариации обнаруживает-

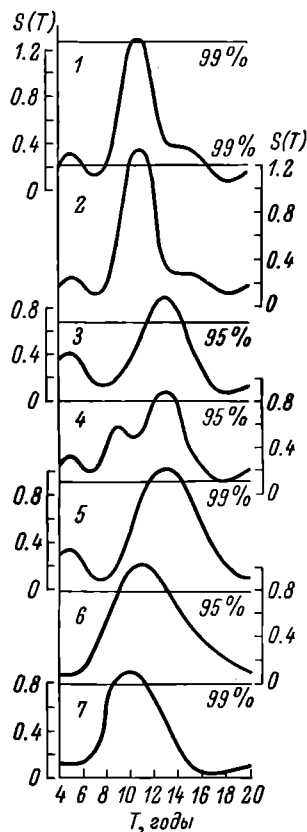


Рис. 5. Спектрограммы значений расходов рек.

1 — сток Невы у Петрокрепости; 2 — сток Вуоксы, Волхова, Свири (суммарно); 3 — сток Северной Двины у Усть-Пинеги; 4 — сток Днепра у Киева; 5 — сток Дона у Калача; 6 — сток Сырдарьи у Беговата; 7 — сток Оби у Новосибирска.

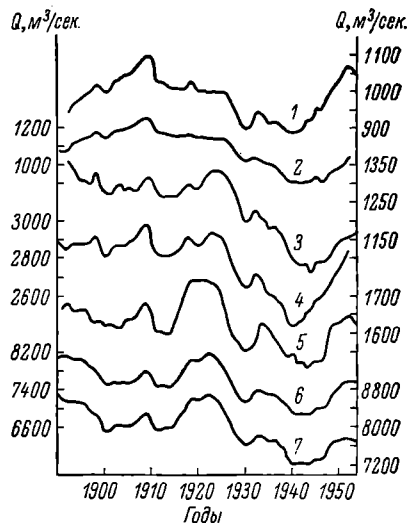


Рис. 6. Средние 21-летние скользящие значения расходов Волги на створах.

1 — приток в Рыбинское водохранилище; 2 — сток Волги у Ярославля; 3 — сток Оки у Горбатова; 4 — сток Волги у Горького; 5 — сток Камы у Перми; 6 — сток Волги у Куйбышева; 7 — сток Волги у Волгограда.

ся в многолетних изменениях стока основных рек, берущих начало в предгорьях Уральского хребта.

Вместе с тем, судя по результатам спектрального анализа рядов по стоку Невы, Вуоксы—Волхова—Свири, Северной Двины, Днепра, Дона, Сырдарьи и Оби, отфильтрованных с применением полосового фильтра «7-11», в многолетних колебаниях стока рек Северо-Запада и Юго-Запада европейской территории Союза (ЕТС), Средней Азии и Западной Сибири, так же как и в колебаниях стока Оки (рис. 5), циклическая вариация с периодом в 15 лет почти не выражена, а преобладает вариация, период которой колеблется от 11 до 13 лет.

В работе И. П. Дружинина (Дружинин и др., 1966) при анализе многолетних колебаний стока рек азиатской части СССР и отдельных рек европейской территории наличие 14—15-летнего колебания также отмечается

лишь в межгодовых изменениях стока Камы, Нижней Волги и Иртыша. Таким образом, преобладание амплитуд циклических колебаний с периодом в 14—15 лет над амплитудами широко распространенных 11-летних колебаний следует, по-видимому, признать региональной особенностью стока рек Камско-Уральского бассейна и Нижней Волги.

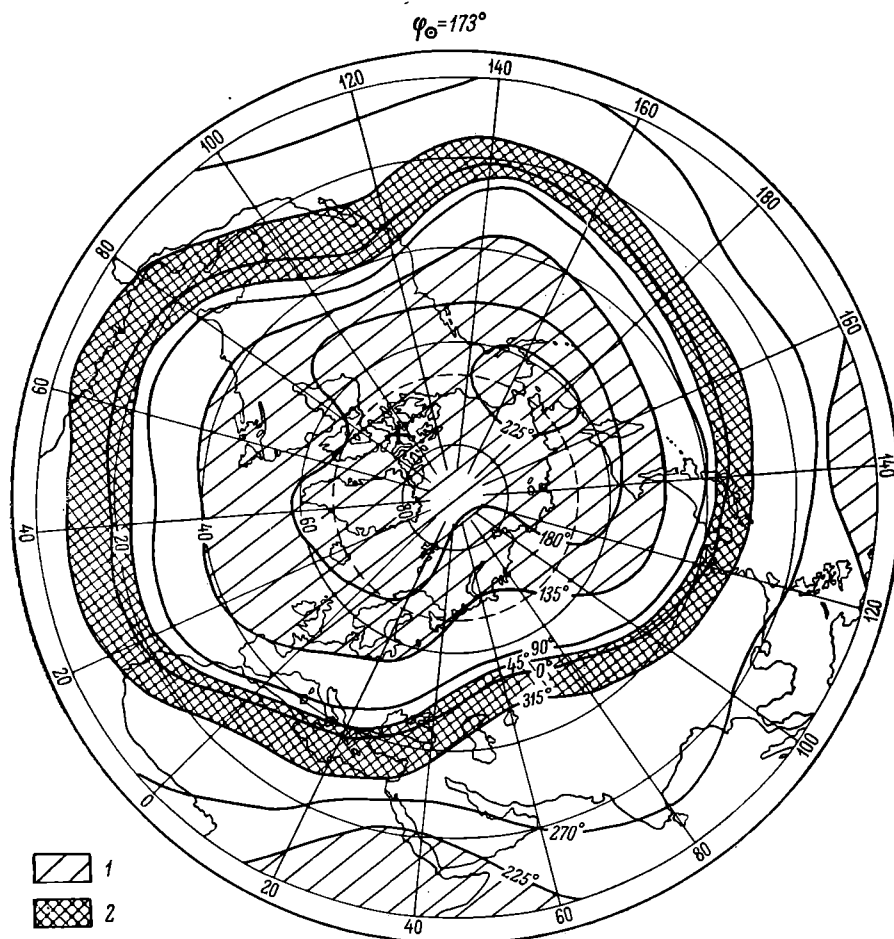


Рис. 7. Распределение фаз 11-летних колебаний атмосферного давления в северном полушарии.

1 — район, в котором колебания атмосферного давления идут в фазе с колебаниями солнечной активности; 2 — район, в котором колебания атмосферного давления идут в фазе, обратной фазе колебаний солнечной активности (по Гасюкову и Смирнову, 1967).

Что же касается циклической вариации с периодом около 11 лет, то ее существование в многолетних колебаниях стока рек различных районов земного шара было показано в ряде работ (Кочукова, 1955; Джорджо, 1957; Калинин, Давыдова, 1968; Коноваленко и др., 1968).

Полученные нами результаты дополняют эту картину. Рассматривая их совместно с данными других исследований, можно прийти к заключению, что существование 11-летних циклических колебаний в многолетней изменчивости речного стока является общепланетарной закономерностью.

Различия в колебаниях стока Верхней и Средней Волги по сравнению со стоком Камы наблюдаются и при анализе «вековой» тенденции в изменениях стока Волги.

Изучение «вековой» изменчивости речного стока проводилось с помощью графического анализа кривых, построенных по 21-летним скользящим средним значениям расходов на различных створах Волги, Оки и Камы (рис. 6). Анализируя «вековую» тенденцию в стоке Волги, необходимо прежде всего отметить значительное уменьшение расходов на всех рассматриваемых створах с начала текущего столетия вплоть до 40-х годов. Это обстоятельство особенно характерно для Верхней Волги. Так, приток в Рыбинское водохранилище и расходы Волги у Ярославля уменьшились примерно на 20%. В среднем же уменьшение стока Волги от начала века к 40-м годам составило 16—17%. С середины 40-х годов на всех створах рек волжского бассейна наблюдается увеличение расходов, которое, по-видимому, достигло максимума к началу 60-х годов.

Наряду с такой общей картиной «вековой» изменчивости речного стока между стоком Верхней Волги и стоком Камы и Нижней Волги действительно обнаруживается существенное различие. Сток Верхней Волги был максимальным в конце 900-х годов, после чего началось его постепенное уменьшение. Падение же стока Камы в «вековом» цикле началось раньше, однако в конце второго десятилетия произошло резкое увеличение расходов Камы, которые достигли максимальных значений в начале 30-х годов, после чего сток резко уменьшился. «Вековая» тенденция в ходе стока Нижней Волги носит аналогичный характер, но проявляется в более сглаженном виде.

При исследовании многолетних колебаний стока неоднократно указывалось на связь 11-летних колебаний и «векового» тренда в стоке с ходом солнечной активности (Апполов, Алексеева, 1959; Резниковский, 1960; Дружинин и др., 1966). Однако изучения возникновения солнечнообусловленных вариаций в стоке в широком сопоставлении с колебаниями барического поля и циркуляции атмосферы обычно не проводилось. Это было связано прежде всего с почти полным отсутствием глобальных исследований, касающихся как стока, так и колебаний барического поля Земли. Локальные же исследования обычно не позволяют достоверно определить генетические зависимости в сложной системе климатических колебаний.

Выполненные в последние годы работы по изучению циклических колебаний водности рек северного полушария (Давыдова и Калинин, 1967) и результаты изучения 11-летних колебаний барического поля (Гасюков и Смирнов, 1967) позволяют рассмотреть зависимость колебаний стока от солнечнообусловленных изменений барика в северном полушарии. В основу такого сопоставления, естественно, должны быть положены пространственные закономерности изменений барического поля и характера стока по территории.

На рис. 7 представлено распределение фаз 11-летних колебаний давления в северном полушарии, а на рис. 8, заимствованном из работы Г. П. Калинина (1968), приведено распределение фаз по территории для 11-летнего цикла колебаний водности рек. Сопоставление фазных закономерностей колебаний давления и стока приводит к выводу об определенной обратной зависимости последнего от характера изменения давления. В то время как начальная фаза давления над всем Арктическим бассейном, в том числе и над районом Скандинавского полуострова и Канадой, близка к 180° , 11-летние колебания стока в этих районах имеют фазу, близкую к 0° . В средних же широтах Европы, Азии и Америки фаза колебаний стока равна 270° — 300° , в то время как изменения давления имеют фазу 90° — 135° . В районах Средней Азии и Китая фаза колебаний стока близка к 120° , а фаза изменения давления составляет 270° — 315° .

Обратный характер зависимости колебаний стока от хода давления в 11-летнем ритме, выраженный исключительно четко над всей территорией северного полушария, позволяет объяснить асинхронность колеба-

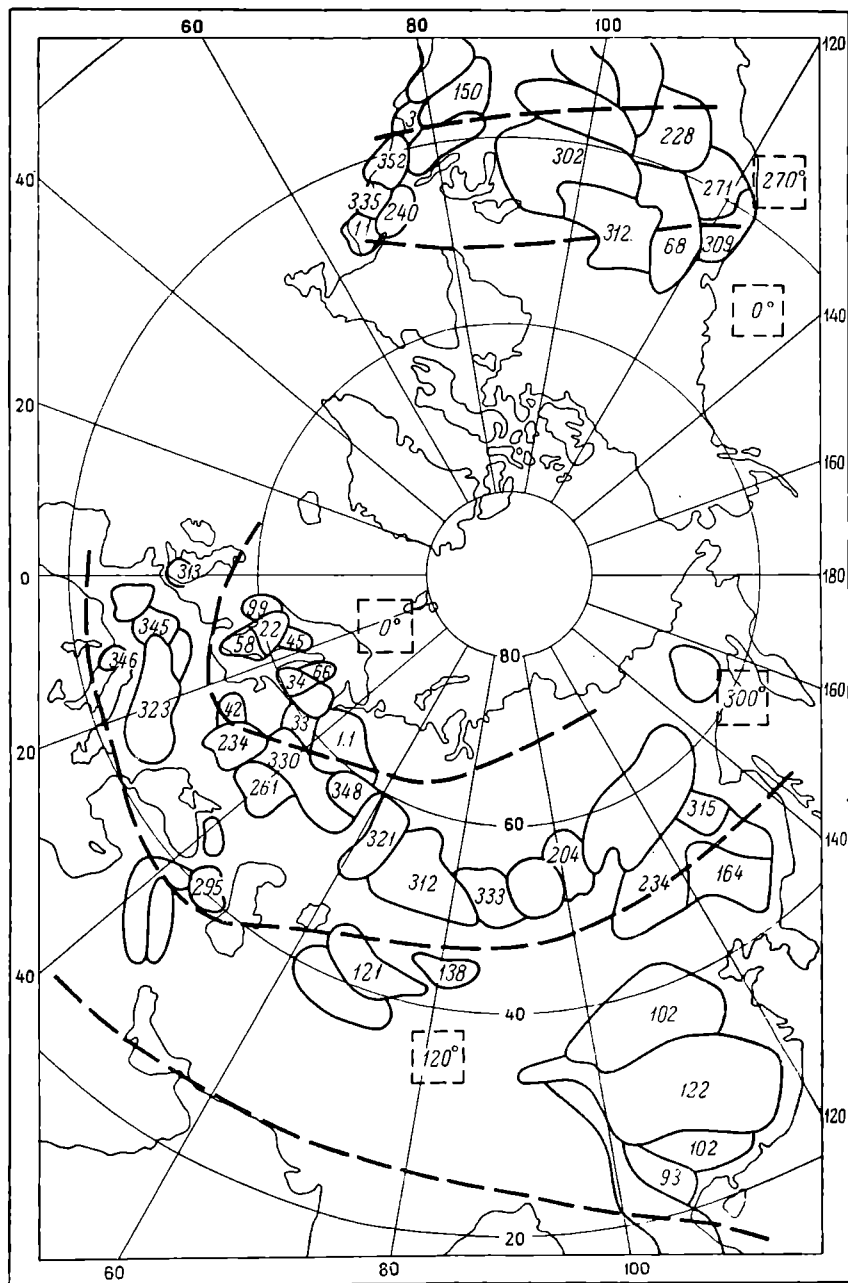


Рис. 8 Схема распределения фаз 11-летнего цикла колебаний водности рек северного полушария (по Калинин, 1968).

ний стока в различных районах в зависимости от уровня солнечной активности.

Бассейн Волги расположен в зоне, над которой 11-летние колебания давления имеют фазу от 45 до 135° (в среднем 90—100°). В сопоставлении с 11-летними изменениями солнечной активности (фаза относительно 1900 г. равна 176°) это означает, что наступление максимума давления запаздывает относительно максимума солнечной активности приблизительно на 80—90°, или на 2—3 года. Исходя из обратного характера связи хода давления с изменениями стока, можно предполагать, что фаза 11-летних колебаний стока рек волжского бассейна должна быть близка к 270—280°, т. е. через 2—3 года после максимума солнечной активности должен наблюдаться минимальный сток.

Т а б л и ц а 1

Амплитуда (А) и фазы (φ) 11-летних колебаний стока Волги, осадков над ЕТС и форм атмосферной циркуляции в Атлантической зоне северного полушария

Характеристика	Периоды наблюдений, годы	А, м³/сек.	$\frac{A}{A_{абс.}}$, %	φ ^о t ₀ = 1900 г.
Сток Волги				
Приток в Рыбинское водохранилище	1882—1966	89	16	253°
Волга — Ярославль	1877—1963	96	16	247
Ока — Горбатов	1882—1964	95	17	212
Волга — Горький	1877—1962	213	15	228
Кама — Пермь	1881—1964	97	14	243
Волга — Куйбышев	1877—1964	486	14	238
Волга — Волгоград	1879—1964	459	12	240
Осадки				
Ленинград	1881—1950	34	17	288
Москва	1881—1950	35	14	288
Казань	1881—1950	36	11	286
Пермь	1885—1950	26	10	285
Формы циркуляции				
W	1891—1966	12	20	257
E	1891—1966	10	14	99
Солнечная активность				
Числа Вольфа	1900—1967	—	—	176

Результаты периодограммного анализа (табл. 1) полностью подтверждают эти соображения. Фазы колебаний стока Волги в верхнем, среднем и нижнем течении близки между собой и равны 240—250°, что соответствует значениям фаз, полученным из теоретических предпосылок по результатам анализа барического поля в северном полушарии. Следует отметить хорошее соответствие полученных результатов общей схеме распределения фаз 11-летних колебаний стока по территории (рис. 8).

Чтобы определить характер зависимости колебаний стока от изменения солнечной активности, были рассчитаны взаимокорреляционные функции отфильтрованных с помощью фильтра «7-11» стоковых рядов на створах Волги, Оки и Камы с числами Вольфа с 1900 по 1957 г. (рис. 9). Анализ хода взаимокорреляционных функций приводит к следующим выводам. Влияние солнечной активности на колебания стока четко проявля-

ется в периодичности хода функций, которая свидетельствует о том, что связь «солнечная активность—колебания стока Волги», оставаясь постоянной по знаку, достигает наибольшей тесноты один раз в 10 лет, а именно этот период и характерен для циклической деятельности Солнца в рассматриваемом интервале времени. Наибольшее влияние солнечная активность оказывает на сток Верхней Волги и наименее четко это влияние сказывается в многолетних колебаниях стока Оки.

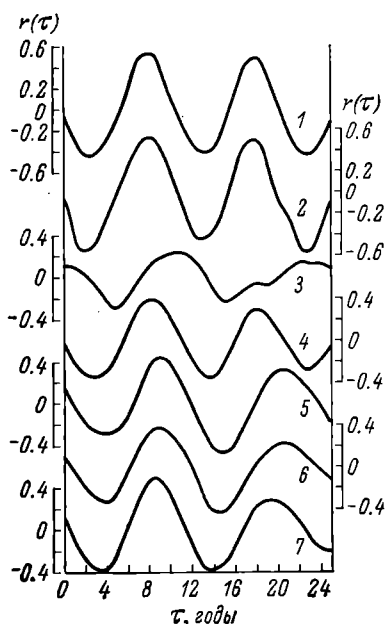


Рис. 9. Взаимокорреляционные функции между среднегодовыми числами Вольфа и аномалиями среднегодовых расходов Волги на створах (фильтр «7-11»).

1 — приток в Рыбинское водохранилище; 2 — сток Волги у Ярославля; 3 — сток Оки у Горбатова; 4 — сток Волги у Горького; 5 — сток Камы у Перми; 6 — сток Волги у Куйбышева; 7 — сток Волги у Волгограда.

солнечной активности наблюдается увеличение стока, а через три года после максимума солнечной активности для Верхней Волги и через четыре года для Нижней Волги отмечается минимальный сток.

Установленные закономерности 11-летних колебаний стока Волги подтверждаются и при анализе многолетнего хода осадков на европейской территории СССР. Так, в табл. 1 приведены среднегодовые значения осадков по четырем пунктам за период 70 лет. Средняя фаза 11-летней вариации осадков над рассматриваемой территорией отличается точно на 180° от фазы изменения давления в 11-летнем цикле и примерно на $30-40^\circ$ опережает фазы колебаний стока Волги. Это означает, что максимальные и минимальные по водности годы наступают на следующий год после моментов максимальных или минимальных осадков над бассейном Волги.

Выполненный анализ не позволяет, однако, судить о характерных особенностях и различиях в колебаниях стока Верхней Волги и Камы. Как было установлено, колебания стока Волги в диапазоне 9—16 лет имеют две составляющие с периодами около 10 и 14 лет. При этом если для Верхней Волги характерна циклическая вариация с периодом в 10 лет, то для бассейна Камы преобладающей является 15-летняя вариация. Объясне-

Судя по ходу взаимокорреляционных функций, характер связи «солнечная активность—колебания стока» несколько различен для стока Верхней и Нижней Волги. Наступление максимально многоводных лет наблюдается в стоке Верхней и Средней Волги через 1—2 года после минимума солнечной активности, а в стоке Нижней Волги — через 2—3 года. Аналогично этому минимальный сток возникает в районе Верхней и Средней Волги через 2—3 года после максимума солнечной активности, а в районе Нижней Волги — через 3—4 года. Такой характер связи вариаций солнечной деятельности с 11-летними колебаниями стока Волги полностью соответствует теоретическим соображениям, вытекающим из характера колебаний барического поля в рассматриваемом цикле под воздействием солнечной активности.

На рис. 10 представлено непосредственное сопоставление среднегодовых значений чисел Вольфа с колебаниями стока Верхней (приток в Рыбинское водохранилище) и Нижней (сток у Волгограда) Волги, проведенное после фильтрации с помощью фильтра «7-11». Как следует из выполненного сопоставления, установленная выше закономерность отмечается довольно четко. Через 1—2 года после минимума

ние этому, видимо, надо искать в особенностях циркуляции атмосферы. В работе П. С. Гасюкова и Н. П. Смирнова (1967) показано, что с увеличением солнечной активности происходит повышение давления в высоких широтах и областях расположения барических депрессий, в то же время в зоне антициклонов давление падает. Все это предрасполагает к нарушению зональной циркуляции на полушарии и развитию меридиональных процессов. Однако характер меридиональной циркуляции может значительно различаться при разных ее формах. Так, при циркуляции формы С над всей территорией европейской части СССР располагается область

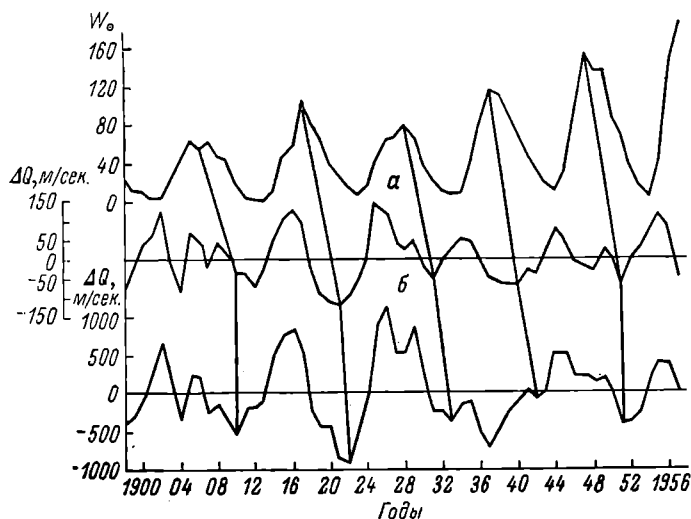


Рис. 10. Сопоставление среднегодовых чисел Вольфа с аномалиями среднегодовых расходов Волги (фильтр «7-11»).
а — приток в Рыбинское водохранилище; б — сток Волги у Волгограда.

пониженного давления, а при циркуляции формы Е, наоборот, повышенного.

В настоящее время установлено, что северная и центральная части ЕТС, а следовательно северная и центральная части бассейна Волги, находятся в основном под воздействием западного переноса влаги с Атлантического океана (Афанасьев, 1967). Следовательно, увеличение стока Волги должно наблюдаться при западной форме циркуляции W. Однако и при меридиональной циркуляции формы С, как было показано авторами при рассмотрении 7-летнего цикла (Смирнов и др., 1972), на ЕТС поступает значительное количество влаги. Таким образом, можно предполагать, что помимо моментов усиления западного переноса увеличение стока в 11-летнем цикле может происходить и при развитии меридиональных процессов формы С. Это положение наглядно проявилось при изучении 7-летнего ритма, в котором, как было установлено, основную роль в усилении стока играет именно циркуляция формы С.

При рассмотрении 11-летней вариации в стоке Волги нами, как и в случае 7-летнего цикла, были рассчитаны взаимокорреляционные функции между среднегодовыми значениями повторяемости форм циркуляции W, С, Е и годовыми расходами на пяти створах, предварительно отфильтрованными с помощью фильтра «7-11». Коэффициенты корреляции при различных значениях сдвига τ представлены в табл. 2.

Коэффициенты корреляции повторяемости форм циркуляции с 11-летними колебаниями стока Волги (1905—1957 гг.)

Река — пункт	τ (годы)										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ф о р м а W											
Волга — Ярославль . . .	0.38	0.45	0.33	0.19	—0.08	—0.32	—0.42	—0.37	—0.09	0.35	0.62
Ока — Горбатов . . .	0.09	0.21	0.36	0.47	0.33	—0.11	—0.48	—0.44	—0.19	0.10	0.23
Волга — Горький . . .	0.32	0.36	0.33	0.31	0.03	—0.37	—0.54	—0.43	—0.08	0.33	0.54
Кама — Пермь . . .	0.25	0.35	0.17	0.01	—0.11	—0.21	—0.29	—0.33	—0.18	0.19	0.44
Волга — Волгоград . .	0.29	0.28	0.19	0.15	—0.06	—0.36	—0.48	—0.37	—0.13	0.22	0.36
Ф о р м а С											
Волга — Ярославль . . .	—0.08	0.05	0.13	0.21	0.19	0.12	0.05	—0.16	—0.42	—0.44	—0.23
Ока — Горбатов . . .	—0.06	0.13	0.19	0.09	0.04	0.10	0.23	0.17	—0.24	—0.51	—0.42
Волга — Горький . . .	—0.10	0.08	0.21	0.25	0.18	0.10	0.08	—0.07	—0.41	—0.56	—0.39
Кама — Пермь . . .	0.19	0.42	0.51	0.50	0.26	—0.03	—0.23	—0.38	—0.45	—0.42	—0.31
Волга — Волгоград . .	0.16	0.44	0.49	0.42	0.25	0.08	—0.02	—0.20	—0.47	—0.56	—0.40
Ф о р м а Е											
Волга — Ярославль . . .	0.07	—0.05	—0.17	—0.26	—0.27	—0.07	—0.03	0.04	0.11	0.10	—0.04
Ока — Горбатов . . .	—0.19	—0.28	—0.09	0.04	—0.04	—0.03	—0.08	—0.05	0.16	0.13	—0.10
Волга — Горький . . .	—0.05	—0.17	—0.14	—0.07	—0.12	—0.04	—0.07	—0.03	0.15	0.14	—0.07
Кама — Пермь . . .	—0.14	—0.16	—0.18	—0.23	0.00	0.15	0.12	0.06	0.05	0.06	0.07
Волга — Волгоград . .	—0.19	—0.24	—0.15	—0.10	—0.05	0.01	0.00	0.03	0.18	0.17	0.06

—0.06
—0.08
—0.13
0.08
0.07

Из этой таблицы следует, что между повторяемостью формы W и колебаниями стока наблюдается прямая связь со сдвигом в 1 год. Этот результат хорошо подтверждается и при сопоставлении фаз колебаний стока и 11-летней вариации в зональности на полушарии (табл. 1). При этом для стока Верхней и Средней Волги теснота связи с повторяемостью формы W выше, чем для бассейна Камы и Нижней Волги. Между повторяемостью циркуляционных процессов формы С и колебаниями стока Волги также наблюдается положительная связь, но со сдвигом в 2—3 года. При этом для стока Камы теснота связи повторяемости циркуляции формы С оказалась значительно выше, чем для Верхней и Средней Волги. Связь колебаний стока с повторяемостью циркуляции формы Е во всех случаях отрицательна. Таким образом, как и при 7-летней вариации, можно считать, что циркуляция формы С оказывает значительное более существенное влияние на сток в бассейне Камы, а следовательно и на сток Нижней Волги, чем формы W.

В то же время в отличие от 11-летней вариации связь 7-летних колебаний стока с повторяемостью формы W, как было показано авторами (Смирнов и др., 1972), носит обратный характер. Это противоречие объясняется, по нашему мнению, различным характером проявления в барическом поле северного полушария влияния солнечной активности и деформирующих сил, созданных движением полюсов Земли.

На максимуме солнечной активности происходит глобальное повышение атмосферного давления в высоких широтах и понижение в зонах субтропических максимумов, что приводит к нарушению зональности в целом по полушарию и создает предпосылки для преимущественного развития циркуляционных процессов формы Е, при которых наблюдается понижение стока в бассейне Волги. Влияние же силы деформации проявляется в локальном повышении давления над областью исландской депрессии при прохождении радиусом-вектором полюса меридиана Гринвича и понижении в районе алеутского минимума давления. Следствием этого является локальное нарушение зональности и преобладание над европейской территорией в зимний период процессов формы С, при которых сток в бассейне Волги повышается. Кроме того, следует учитывать, что влияние движений полюса на циркуляцию атмосферы носит по существу сезонный характер и, следовательно, отмеченные преобразования форм циркуляции присущи именно зимнему периоду.

Нельзя также не обратить внимания и на особенность характера изменения связи повторяемости форм циркуляции W и С с 11-летними колебаниями стока. Если для связи повторяемости формы W с колебаниями стока мы имеем четко выраженное изменение с периодом около 10 лет, то при сопоставлении повторяемости формы С с колебаниями стока, особенно Нижней Волги, этот период значительно увеличивается и составляет 14—15 лет. Отсюда естественно предположить, что именно ход повторяемости циркуляции формы С имеет 14—15-летнюю цикличность.

Действительно, спектральный анализ среднегодовых значений повторяемости форм W и С после фильтрации с помощью фильтра «7-11» показывает (рис. 11), что если в повторяемости западной формы цирку-

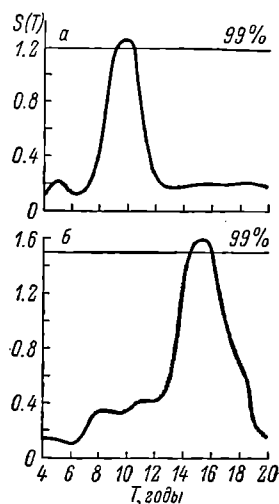


Рис. 11. Спектрограммы аномалий повторяемости форм атмосферной циркуляции (фильтр «7-11»). а — форма W; б — форма С.

ляции присутствует единственная и значительная вариация с периодом около 10 лет, то в повторяемости формы С статистически достоверной является лишь вариация с периодом около 15 лет. Отсюда становится понятным преобладание 15-летней цикличности в стоке бассейна Камы, на формирование которого определяющее воздействие оказывает меридиональная циркуляция формы С, и, наоборот, некоторое преобладание 10-летней вариации в стоке Верхней Волги, находящейся в большей зависимости от повторяемости западного переноса. Сопоставление начальных фаз 15-летней вариации в колебаниях стока Волги и повторяемости меридиональной циркуляции формы С показывает их хорошее соответствие (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Амплитуда (А) и фазы (φ) 15-летних колебаний стока Волги и форм атмосферной циркуляции в атлантической зоне северного полушария

Характеристика	Период наблюдений	$\frac{A}{A_{абс.}}$, %	φ^0 $t_0 = 1900$ г.
Сток Волги			
Приток в Рыбинское водохранилище	1882—1966	17	99
Волга — Ярославль	1877—1963	13	74
Ока — Горбатов	1882—1964	16	94
Волга — Горький	1877—1962	13	101
Кама — Пермь	1881—1964	19	125
Волга — Куйбышев	1877—1964	18	99
Волга — Волгоград	1879—1964	16	104
Формы циркуляции			
С	1891—1966	30	115
Е	1891—1966	12	318

Полученные результаты объясняют и приуроченность этой специфической вариации в колебаниях стока к определенному району и ее слабое проявление на всей остальной территории СССР, поскольку, как это следует из характера распределения аномалий давления при циркуляции формы С (Гирс, 1960), наибольшие отрицательные аномалии над материком приурочены именно к району, прилегающему к Уральскому хребту. Действительно, как указывалось выше, все реки этой области имеют заметную вариацию с периодом 14—15 лет, в колебаниях же стока рек других районов она либо отсутствует, либо выражена очень слабо.

Причины возникновения 15-летней вариации в повторяемости меридиональной циркуляции формы С в настоящее время неизвестны. Литературных данных о проявлении подобной цикличности в колебаниях климата различных районов Земли почти нет. Все это позволяет предполагать отсутствие какой-либо особой общепланетарной причины, приводящей к возникновению 15-летней вариации в повторяемости меридиональной циркуляции формы С, а следовательно, и стока рек волжского бассейна. По-видимому, возникновение этой вариации связано с особенностями атмосферной циркуляции, присущими рассматриваемому району.

Авторами было установлено (Смирнов и др., 1972), что определяющую роль в возникновении 7-летнего цикла в стоке рек бассейна Волги играет меридиональная циркуляция формы С. Семилетняя цикличность проявляется на фоне изменения циркуляционных процессов под воздействием 11-летнего цикла солнечной активности. При этом на минимуме солнечной активности преимущественное развитие получает западная

форма циркуляции W, которая наиболее свойственна атмосфере Земли вследствие глобальных тепловых контрастов между северными и южными широтами. В периоды высокой солнечной активности, как было показано, создаются предпосылки для развития меридиональных процессов. Поэтому можно предположить, что в годы, когда прохождение радиусом-вектором Гринвичского меридиана в зимний период совпадает с периодом высокой активности Солнца, развитие меридиональной циркуляции формы С значительно более выражено. Когда же этот момент приходится на период низкой активности Солнца, развитие циркуляционных процессов формы С затруднено.

На рис. 12 представлена схема взаимодействия 11-летнего солнечно-обусловленного цикла в характере циркуляции атмосферы, средняя длина которого за последние 50—60 лет составляла 10 лет, с 7-летним

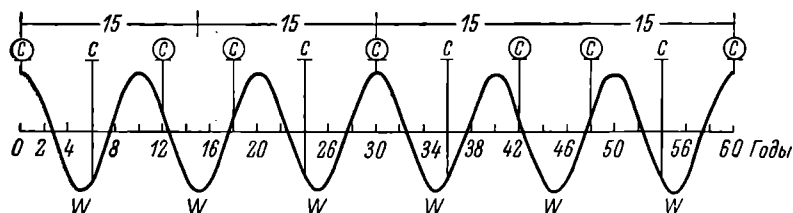


Рис. 12. Возможная схема возникновения 15-летнего цикла в повторяемости меридиональной циркуляции формы С.

циклом, длина которого за эти же годы может быть принята равной 6 годам. Из этой схемы видно, что в данном случае в повторяемости развития циркуляции формы С может возникать биение с периодом около 15 лет. Видимо, указанная особенность, которая присуща именно развитию циркуляционных процессов формы С, и находит свое отражение в возникновении 15-летних колебаний стока в бассейне Волги и особенно в бассейне Камы.

Основные закономерности влияния солнечной активности на колебания стока Волги в 11-летнем цикле в той же мере проявляются и при сопоставлении «вековых» колебаний стока с «вековым» изменением среднего уровня солнечной активности.

Анализируя «вековой» ход стока Волги, рассмотрим его в зависимости от изменения основных форм атмосферной циркуляции. При этом будем учитывать, что, как было установлено при изучении 11-летней цикличности в стоке Волги, поступление влаги на ЕТС связано в основном с зональным переносом (форма W), а также с усилением повторяемости меридиональной циркуляции формы С.

На рис. 13 представлен ход 21-летних скользящих значений повторяемости форм атмосферной циркуляции W, С, Е в сопоставлении с 21-летними скользящими значениями стока Волги у Волгограда, а также «вековой» тенденцией в изменениях солнечной активности. Как следует из этого рисунка, период с 1900 по 1922 г. характеризуется высоким уровнем повторяемости зональной циркуляции, при этом наибольшая повторяемость циркуляции формы W характерна для периода 1914—1922 г. В этот же период наблюдаются и повышенные значения стока Волги, особенно около 1920 г. После 1922 г. вплоть до 1940 г. имел место резкий спад повторяемости западной формы циркуляции W, а с 1922 по 1930 г. отмечалось значительное увеличение повторяемости формы Е. В то же время повторяемость циркуляционных процессов формы С оставалась на довольно низком постоянном уровне. Именно вследствие такого характера атмосферной циркуляции с 1922 по 1930 г. произошло резкое сни-

жение стока Волги. После 1930 г. при продолжающемся спаде повторяемости циркуляции формы W наступила стабилизация повторяемости восточной формы циркуляции E и начался рост меридиональной формы циркуляции C. Сток Волги в этот период, видимо прежде всего за счет уменьшения повторяемости формы W, продолжал уменьшаться вплоть до 1940—1944 гг., однако не столь резко. Усиление повторяемости циркуляционных процессов формы C в указанный период, вероятно, отразилось только на некотором замедлении уменьшения стока Волги. К 1950 г. на фоне относительно постоянного и низкого уровня развития западного

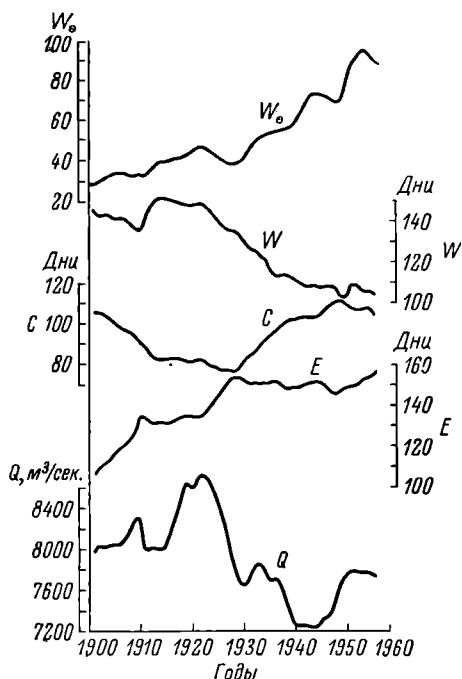


Рис. 13. Сопоставление «векового» тренда в изменениях солнечной активности W_{\odot} , повторяемости форм атмосферной циркуляции W, C, E и стока Волги у Волгограда.

(Гирс, 1956, 1963; Белинский, 1957; Максимов, Смирнов, 1965), при повышении среднего уровня солнечной активности в «вековом» цикле, как и в 11-летнем, нарушается зональность циркуляции на всем полушарии. Действительно, сопоставляя ход повторяемости циркуляции формы W с изменениями солнечной активности (рис. 13), мы получили четко выраженную обратную зависимость. Однако, рассматривая «вековую» тенденцию в изменениях повторяемости меридиональных форм C и E, трудно установить какую-либо зависимость каждой из них от уровня солнечной активности. Если в период с 1900 по 1928 г. наблюдался рост формы E, в то время как повторяемость циркуляции формы C несколько уменьшалась, то после 1928 г. наступила стабилизация повторяемости циркуляции формы E, тогда как повторяемость циркуляции формы C стала значительно расти вплоть до 1950 г.

Можно предположить, что в первую половину «векового» подъема среднего уровня солнечной активности создаются условия для развития циркуляции формы E, а во вторую, т. е. на максимуме солнечной активности, — для циркуляции формы C. Однако результаты изучения 11-лет-

переноса и незначительного уменьшения повторяемости циркуляционных процессов формы E стало наблюдаться заметное развитие процессов формы C, что и привело к некоторому увеличению стока Волги.

Таким образом, зависимость изменения стока Волги от характера изменения атмосферной циркуляции на полушарии в «вековом» цикле полностью соответствует тем закономерностям, которые были получены при анализе 11-летней вариации стока. Учитывая, что расположение высотных гребней и ложбин при меридиональных формах циркуляции C и E имеет определенную локализацию, можно прийти к выводу, что, как и в случае 11-летнего цикла, «вековые» изменения стока в различных районах будут носить асинхронный характер в зависимости от положения района относительно основных путей перемещения циклонов при различных формах меридиональной циркуляции.

Переходя к вопросу о причинах «вековых» изменений форм циркуляции, следует отметить, что, как было показано в целом ряде работ

него цикла в атмосфере показывают, что он наиболее выражен в повторяемости циркуляции форм W и E и совсем не наблюдается в повторяемости циркуляции формы С, где отмечается циклическая вариация с периодом 15 лет. Это позволяет считать, что повышение солнечной активности, вызывая нарушения зональной циркуляции, создает предпосылки для преимущественного развития циркуляции формы E. В то же время меридиональная циркуляция формы С, как было показано авторами (Смирнов и др., 1972), в большей степени обусловлена колебаниями полюса вращения Земли, притом ее наибольшее развитие связано с перемещением полюса в сторону Атлантики (составляющая радиуса-вектора полюса на меридиан Гринвича имеет максимальные положительные значения).

Если рассматривать с этих позиций «вековую» тенденцию в изменениях повторяемости форм атмосферной циркуляции, то можно предполагать, что и в данном случае помимо влияния солнечной активности на ход атмосферной циркуляции может оказывать воздействие «вековое» перемещение полюса вращения Земли.

В настоящее время рядом исследований установлено, что помимо свободного (с периодом 14 месяцев) и вынужденного (с периодом 12 месяцев) движений полюс испытывает небольшое «вековое» смещение. Обращаясь к последним данным по «вековому» движению полюса (Карклин, Саруханян, 1966), можно отметить, что если до 1930 г. движения полюса характеризовались незначительным смещением относительно его начального положения, то с 1930 г. стало происходить генеральное смещение полюса в направлении Северной Атлантики (в среднем по меридиану 60° з. д.). Именно с этого момента в «вековом» ходе получила преимущественное развитие меридиональная циркуляция формы С.

Таким образом, преобразование форм атмосферной циркуляции в «вековом» цикле, по нашему предположению, связано с изменениями «векового» уровня солнечной деятельности и «вековым» смещением «среднего» полюса вращения Земли. Этот вывод может рассматриваться только как рабочая гипотеза, требующая широкой проверки прежде всего на основе данных по барическому полю в масштабах всего северного полушария.

ЛИТЕРАТУРА

- Апполов Б. А. и К. И. Алексеева. 1959. Связь деятельности Солнца с явлениями, определяющими сток рек. Тр. III Всесоюз. гидрол. съезда, т. VII.
- Афанасьев А. Н. 1967. Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР. М.
- Белинский Н. А. 1957. Использование некоторых особенностей атмосферных процессов для долгосрочных прогнозов. Л.
- Гасюков П. С. и Н. П. Смирнов. 1967. Колебания барического поля северного полушария в 11-летнем цикле солнечной активности. ДАН СССР, т. 173, № 3.
- Гирс А. А. 1956. Многолетние преобразования форм атмосферной циркуляции и изменения солнечной активности. Метеорол. и гидрол., № 10.
- Гирс А. А. 1960. Основы долгосрочных прогнозов погоды. Л.
- Гирс А. А. 1963. Внутризональные преобразования форм атмосферной циркуляции и их причины. Тр. Аркт. и Антаркт. инст., т. 255.
- Давыдова А. И. и Г. П. Калинин. 1967. Пространственно-временной анализ цикличности стока. Вестн. Моск. унив., сер. геогр., № 4.
- Джорджио З. В. 1957. Опыт долгосрочных прогнозов стока рек Средней Азии. Изд. Среднеазиатск. гидрометеорол. управл. Ташкент.
- Дружинин И. П., З. П. Коноваленко, В. П. Кукущкина, И. В. Хамьянова. 1966. Речной сток и геофизические процессы (связи, цикличность, предвидение). М.
- Калинин Г. П. 1968. Проблемы глобальной гидрологии. Л.
- Калинин Г. П., А. И. Давыдова. 1968. Циклические колебания стока рек северного полушария. В кн.: Проблемы речного стока. Изд. МГУ.
- Карклин В. П., Э. И. Саруханян. 1966. К изучению векового движения полюса Земли с 1900 по 1958 г. ДАН СССР, т. 166, № 4.

- Кондрацова О. Ф., Э. И. Саруханян, Н. П. Смирнов. 1970. О «вековой» тенденции в колебаниях стока Волги. Бюлл. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, № 8.
- Коноваленко З. П., С. Г. Агарков, И. П. Дружинин. 1968. О солнечной составляющей в многолетних колебаниях стока рек. Солнечные данные, № 12.
- Кочкова Т. Н. 1955. Колебания годового стока рек СССР. Тр. Гос. гидрол. инст., вып. 50 (104).
- Максимов И. В., Н. П. Смирнов. 1965. Опыт построения долгосрочного прогноза основных форм атмосферной циркуляции в северном полушарии компонентно-гармоническим методом. Тр. Аркт. и Антаркт. инст., т. 262.
- Резниковский А. Ш. 1960. Гидрологические характеристики ГЭС в объединенной энергосистеме. В кн.: Проблемы гидроэнергетики и регулирования речного стока. М.
- Смирнов Н. П., Э. И. Саруханян и О. Ф. Кондрацова. 1970. Многолетние колебания стока Волги и их возможные причины. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 20 (23).
- Смирнов Н. П., Э. И. Саруханян и О. Ф. Кондрацова. 1972. О природе семилетней цикличности в многолетних колебаниях стока Волги. Наст. сб.
-

О ПРИРОДЕ СЕМИЛЕТНЕЙ ЦИКЛИЧНОСТИ В МНОГОЛЕТНИХ КОЛЕБАНИЯХ СТОКА ВОЛГИ

При изучении многолетних колебаний стока Волги было установлено (Смирнов и др., 1970), что структура многолетней изменчивости стока имеет сложный многокомпонентный характер и складывается из циклических колебаний различной продолжительности, среди которых одной из основных является семилетняя вариация.

Действительно, рассматривая результаты спектрального анализа длительных рядов по стоку Волги, Оки и Камы на различных створах, отфильтрованных с применением полосового фильтра «3-7» (рис. 1),¹ можно видеть, что оценки спектральной плотности на периодах 5—7 лет значительно превышают уровень 99%-й обеспеченности, что указывает на высокую статистическую значимость полученных результатов и свидетельствует о реальности семилетнего цикла.

Реальность рассматриваемой вариации в многолетних изменениях речного стока находит подтверждение и в результатах спектрального анализа среднегодовых расходов рек в районах, примыкающих к территории волжского бассейна. При этом выбранные ряды по длительности и интервалу наблюдений соответствуют рядам по стоку рек Волги, Оки и Камы.

Т а б л и ц а 1

Амплитуда (А) и фазы (φ) семилетних колебаний стока рек бассейна Волги

Река — пункт	Период наблюдений, годы	T (годы)	A , м ³ /сек.	$\frac{A}{A_{абс.}}$, %	$t_0 \approx 1900$ г.
Приток в Рыбинское водохранилище . . .	1882—1966	6—7	68	12	124
Волга — Ярославль . . .	1877—1963	6—7	88	15	122
Ока — Горбатов . . .	1882—1964	5—6	75	13	89
Волга — Горький . . .	1877—1962	6—7	147	10	114
Кама — Пермь . . .	1881—1964	7—8	117	17	116
Волга — Куйбышев . . .	1877—1964	6—7	382	11	114
Волга — Волгоград . . .	1879—1964	6—7	418	12	128
Среднее	—	6.5	—	13	115

¹ Методика фильтрации и спектрального анализа подробно изложена авторами ранее (Смирнов и др., 1970).

На рис. 2—4 представлены спектрограммы многолетних рядов по среднегодовым расходам рек Севера, Северо-Запада и Юго-Запада европейской территории Союза (ЕТС), Средней Азии и Западной Сибири, отфильтрованным с применением полосового фильтра «3-7». Приведенные результаты показывают, что в многолетних изменениях стока рек указанных районов присутствуют циклические колебания продолжительностью 5—8 лет, статистическая значимость которых превышает уровень 99%-й обеспеченности. Характерно, что при указанном непостоянстве периода рассматриваемые колебания речного стока по отдельным районам

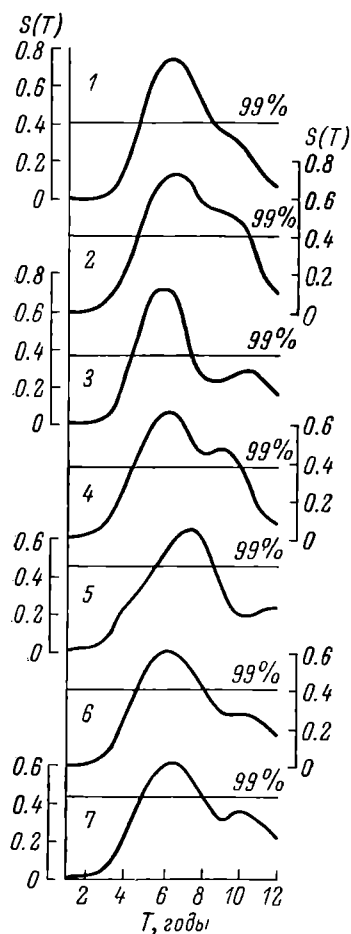


Рис. 1. Спектрограммы значений расходов Волги на створах (фильтр «3-7»).

1 — приток в Рыбинское водохранилище; 2 — сток Волги у Ярославля; 3 — сток Оки у Горбатова; 4 — сток Волги у Горького; 5 — сток Камы у Перми; 6 — сток Волги у Куйбышева; 7 — сток Волги у Волгограда.

присутствуют циклические колебания продолжительностью 5—8 лет, статистическая значимость которых превышает уровень 99%-й обеспеченности. Характерно, что при указанном непостоянстве периода рассматриваемые колебания речного стока по отдельным районам

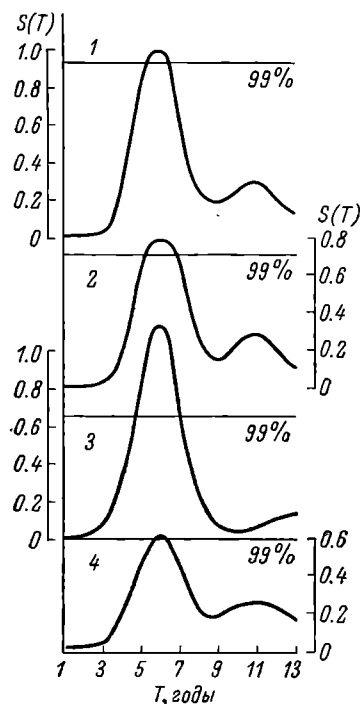


Рис. 2. Спектрограммы значений расходов рек Северо-Запада ЕТС (фильтр «3-7»).

1 — сток Невы у Петрокрепости (1880—1962 гг.); 2 — суммарный сток Вуоксы, Волхова и Свири (1880—1962 гг.); 3 — сток Северной Двины у Усть-Пинеги (1882—1965 гг.); 4 — сток Сухоны (1915—1964 гг.).

относительно однородны. Так, многолетние колебания стока рек Севера и Северо-Запада ЕТС характеризуются четкой шестилетней вариацией, на спектрограммах колебаний речного стока Юго-Запада максимум спектральной плотности располагается ближе к периоду 5 лет, а в стоке рек Средней Азии и Западной Сибири наблюдается вариация со средним периодом 7 лет. Следует отметить, что различные районы волжского бассейна также не являются в этом смысле однородными (табл. 1) и скорее могут быть объединены с отдельными зонами, примыкающими к территории бассейна. Так, район Верхней Волги по характеру шестилетней

вариации близок к Северу и Северо-Западу ЕТС, район Оки — к бассейнам рек Дона и Днепра в их верхнем и среднем течении, а район Камы — к бассейнам рек Западной Сибири.

Таким образом, неоднородность проявления шестилетней вариации, присущая речному стоку в различных районах волжского бассейна, является, по-видимому, характерной особенностью многолетних колебаний стока рек СССР. Причины такой неоднородности заключаются, на наш взгляд, в региональных особенностях отдельных районов, кото-

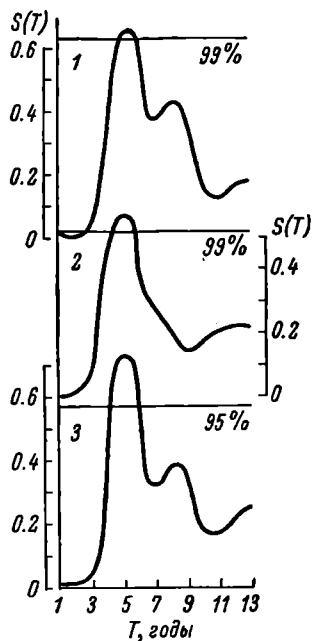


Рис. 3. Спектрограммы значений расходов рек Юго-Запада ЕТС (фильтр «3-7»).

1 — сток Днепра у Киева (1880—1962 гг.); 2 — сток Дона у Калача (1876—1959 гг.); 3 — сток Десны (1895—1964 гг.).

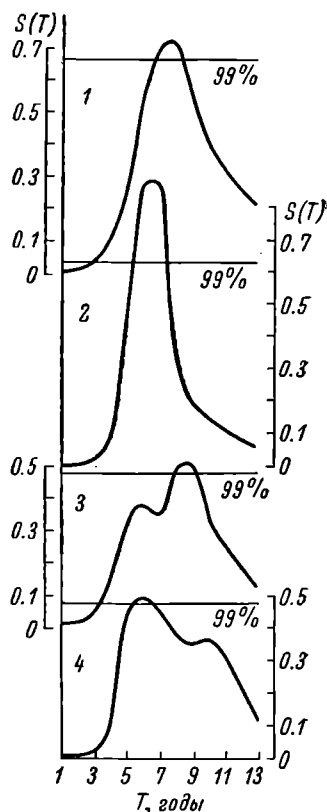


Рис. 4. Спектрограммы значений расходов рек Средней Азии и Западной Сибири (фильтр «3-7»).

1 — сток Сырдарьи у Беговата (1910—1964 гг.); 2 — сток Чирчика у Чимбайлына (1901—1964 гг.); 3 — сток Оби у Новосибирска (1894—1963 гг.); 4 — сток Иртыша у Тобольска (1891—1964 гг.).

рые отражаются на колебательных процессах, общих для всей территории СССР.

В работах последних лет, посвященных изучению многолетних колебаний стока рек, неоднократно указывалось на существование циклических вариаций продолжительностью 5—7 лет. С помощью различных методов анализа их присутствие было обнаружено в многолетних изменениях среднегодовых расходов рек Закавказья (Мусаелян, 1966), Средней Азии (Филонен, 1967) и Сибири (Дружинин и др., 1966). Спектральный анализ стоковых рядов по 72 речным бассейнам северного полушария (Калинин, Давыдова, 1968) также обнаружил в большинстве случаев наличие вариаций с периодами 5—7 лет.

Существование семилетней цикличности в многолетних колебаниях речного стока основных климатических зон северного полушария позволяет предполагать, что ее происхождение связано с процессами, общими для всего полушария, изменения которых происходят в силу некоторых глобальных причин.

Возникновение семилетней вариации в колебаниях циркуляции атмосферы, как было показано ранее (Максимов, 1953; Максимов, Смирнов, 1965), связано с влиянием на барическое поле Земли деформирующей силы, создаваемой движением земных полюсов. На этом основании можно предполагать, что семилетняя цикличность в стоке рек также возникает благодаря влиянию силы деформации, которое проявляется через соответствующие изменения в циркуляции атмосферы. Такое предположение было высказано нами в предыдущей работе (Смирнов и др., 1970),

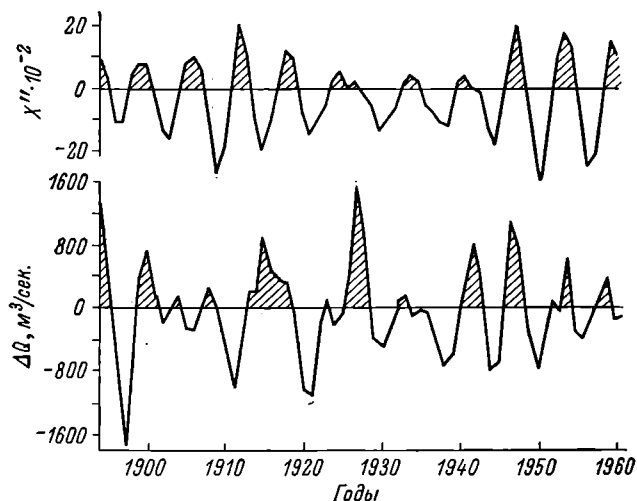


Рис. 5. Сопоставление январских значений координаты X полюса вращения Земли со среднегодовыми значениями аномалий стока Волги у Куйбышева (фильтр «3-7»).

где приводились некоторые факты, подтверждающие связь семилетних циклических колебаний стока Волги с показателями движения полюсов. Полученные результаты дают возможность рассмотреть этот вопрос более подробно.

Приведенные в табл. 1 фазы семилетних колебаний стока рек бассейна Волги в среднем близки к 115° .¹ Учитывая, что начальная фаза семилетней вариации в межгодовых изменениях январских значений X относительно 1900 г. оказалась равной 94° , можно считать, что наступление максимумов в шести-семилетнем колебании стока Волги примерно совпадает с моментом, когда радиус-вектор полюса вращения Земли пересекает меридиан Гринвича в начале года (координата X максимальна и, следовательно, начальная фаза близка к 90°). Это получило подтверждение в сопоставлении величин среднегодовых расходов Волги у Куйбышева, отфильтрованных с применением фильтра «3-7», с ходом январских значений координаты X (рис. 5). Было обнаружено, что в большинстве случаев

¹ Фазы колебаний определялись периодограммным анализом фильтрованных рядов и выбирались на средний период, который во всех случаях совпадает с периодом возмущающей силы. В данном случае фазы относятся к шестилетнему периоду, обнаруженному в изменениях координаты X . Затем значения фаз были приведены к единому начальному моменту $t_0=1900$ г.

моменту пересечения радиусом-вектором меридиана Гринвича в зимние месяцы соответствует максимум стока этого года. Подобные результаты были получены нами и ранее (Смирнов и др., 1970) при корреляционном анализе рядов среднегодовых величин притока в Рыбинское водохранилище и расходов Волги у Ярославля, Куйбышева и Волгограда с 1920 по 1959 г. с 19 рядами значений координаты X на первое число каждого месяца, начиная с ряда ноябрьских значений (1919—1958 гг.) и кончая рядом майских величин (1921—1900 гг.).

Таким образом, совокупность полученных результатов позволяет сделать вывод, что максимальные значения среднегодовых расходов на створах Волги в шести-семилетнем цикле наблюдаются в годы, когда

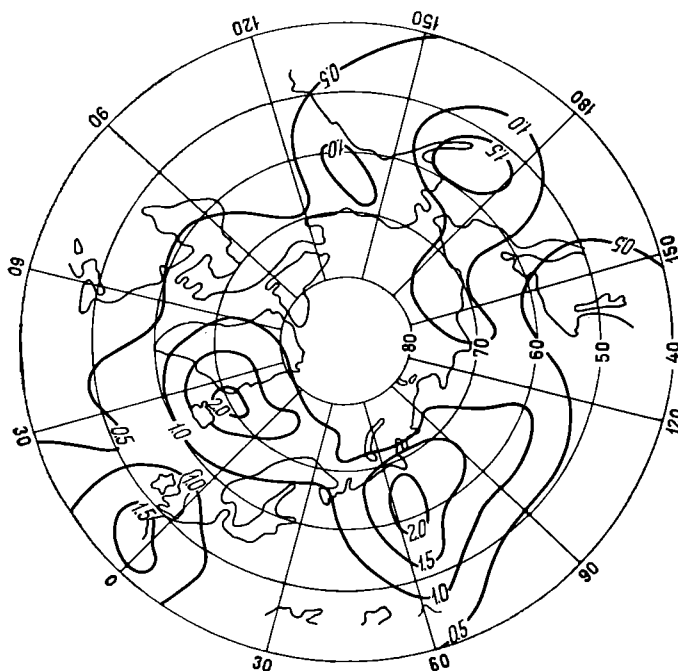


Рис. 6. Схема изоамплитуд 14-месячных колебаний атмосферного давления в умеренных и высоких широтах северного полушария.

радиус-вектор полюса вращения Земли пересекает меридиан Гринвича в зимние месяцы.

Обращаясь к представлениям о характере влияния горизонтальной составляющей силы деформации на барическое поле умеренных и высоких широт северного полушария, попытаемся объяснить обнаруженную связь показателей движения полюса с семилетними колебаниями стока Волги. Воспользуемся для этой цели результатами гармонического анализа 120 семилетних серий среднемесячных аномалий атмосферного давления с 1954 по 1960 г., любезно предоставленными нам Е. П. Борисенковым. Величины аномалий давления были заданы в точках, лежащих через 9° по широте от 40° до 75° и через 15° по долготе от 5° в. д. По результатам гармонического анализа была построена схема изоамплитуд 14-месячных колебаний атмосферного давления в умеренных и высоких широтах северного полушария (рис. 6). Характерно, что на данной схеме области, в которых амплитуды колебаний превышают 1 мб, приурочены к районам локализации основных центров действия атмосферы в северном полушарии: исландского и алеутского минимумов давления, азорского и восточ-

носибирского максимумов. В этих районах средняя амплитуда 14-месячных колебаний давления достигает 1.3—1.5 мб, что составляет до 30% от амплитуды годовых колебаний давления.

Таблица 2

Амплитуды и фазы нутационных колебаний давления в районах расположения основных центров действия атмосферы

Центр действия атмосферы	Средняя долгота	Средняя фаза	Разность средних		Амплитуда, мб
			долгот	фаз	
Исландский минимум	10°W	91°	90°	57°	1.3
Восточносибирский максимум	80 E	148	105	107	1.6
Алеутский минимум	175 W	255	165	196	1.3
Исландский минимум	10 W	91			

Помимо амплитуд, были вычислены фазы 14-месячных колебаний давления, которые затем приводились к моменту пересечения радиусом-вектором меридиана Гринвича. Значения фаз наиболее достоверны в области четко выраженных колебаний давления, поэтому нами были выбраны и осреднены фазы колебаний давления в районах расположения основных центров действия атмосферы. Полученные результаты показывают (табл. 2), что 14-месячные колебания обладают закономерностью, ранее отмеченной у нутационных колебаний уровня Мирового океана (Максимов, 1956; Саруханиян, 1969): начальные фазы колебаний атмосферного давления в различных районах, приведенные к одному моменту, отличаются на величину, соответствующую примерно разности долгот этих районов. Данный факт является подтверждением реальности барического «полюсного прилива» в атмосфере умеренных и высоких широт северного полушария и показывает, что барическая нутационная волна перемещается вслед за радиусом-вектором мгновенного полюса Земли с запада на восток, совершая полный оборот в течение 14 месяцев, т. е. в течение периода свободного движения полюса. При прохождении радиуса-вектора через меридиан Гринвича давление в области исландской депрессии повышается ($\varphi_{гр.} = 90^\circ$), в зоне восточносибирского максимума остается без изменения, а в области алеутской депрессии падает ($\varphi_{гр.} = 255^\circ$). В результате исландский минимум давления заполняется и наблюдается рост давления над Западной Европой и приатлантической Арктикой.

Если рассматривать данный вопрос применительно к изменениям повторяемости форм циркуляции Г. Я. Ваггенгейма—А. А. Гирса, то можно предположить, что описанная барическая ситуация приводит к уменьшению повторяемости в зимние месяцы процессов западной формы W и характерна для преобладания процессов меридиональной циркуляции формы С.

Действительно, как следует из рассмотрения схем аномалий давления при различных формах циркуляции, заимствованных из монографии А. А. Гирса (1960), при преобладании процессов западной формы в области расположения исландского минимума над Арктическим бассейном и северной половиной ЕТС наблюдается отрицательная аномалия давления (рис. 7, а). В субтропической зоне располагается пояс высокого давления, простирающийся над Средиземным морем и южной частью Европы. Происходит зональное смещение барических образований с запада на восток, причем циклоны проходят в основном над Северным Ледовитым океаном и побережьем арктических морей.

В отличие от особенностей, присущих атмосферным процессам при западной форме циркуляции, при процессах меридиональной формы С

в зимнее время года наблюдается локальное повышение давления над областью расположения исландской депрессии и Западной Европой (рис. 7, б), что согласуется с характером состояния барического поля в данном районе, которое создается при прохождении радиусом-вектором полюса вращения Гринвичского меридиана.

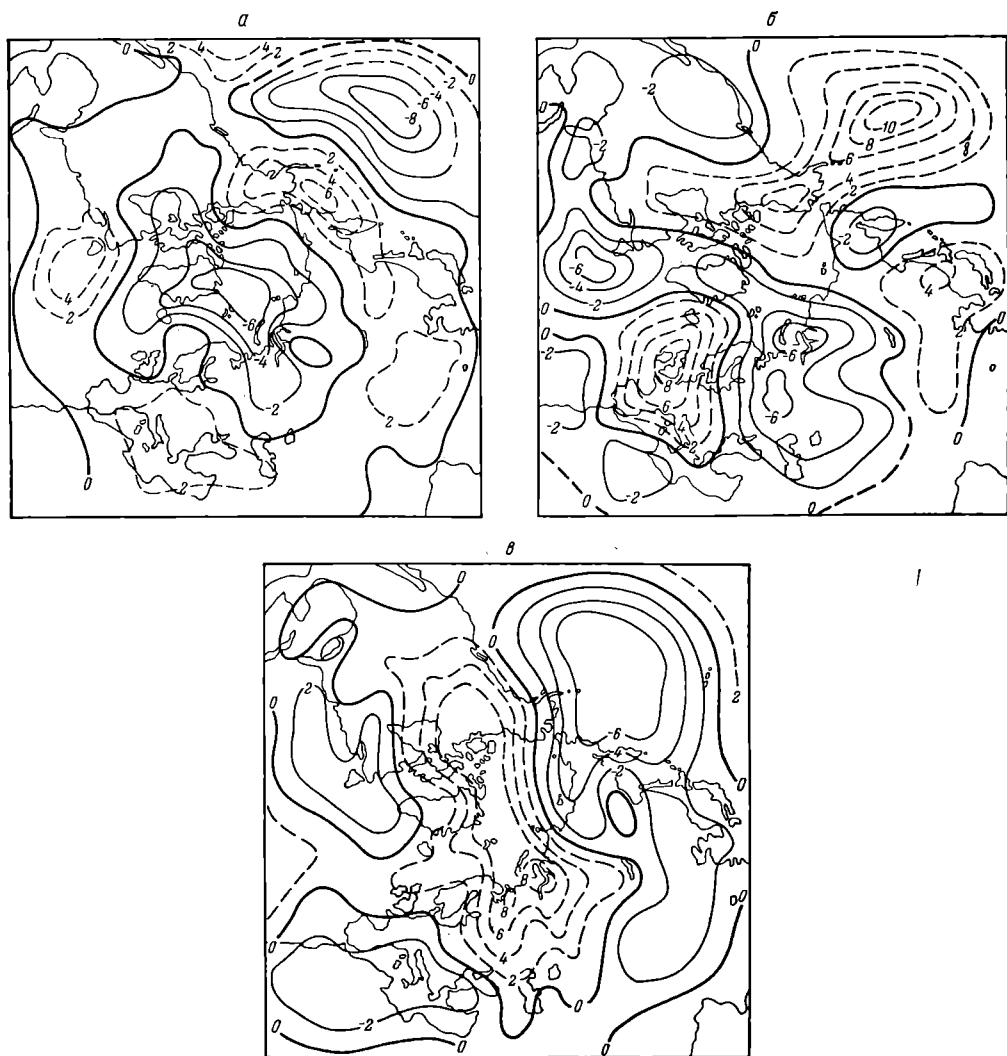


Рис. 7. Аномалии давления при различных формах циркуляции (по Гирсу, 1960):
а — при форме W; б — при форме С; в — при форме Е.

В то же время над всей европейской территорией Союза, особенно над бассейном Волги, а также над восточной частью Средиземного моря и Северной Африкой в зимний период располагается отрицательная аномалия давления. При этом зона наибольшего падения давления над бассейном Волги формируется, очевидно, в результате проникновения на ЕТС циклонов с севера, которые движутся с Северной Атлантики, огибая гребень высокого давления над Западной Европой, и с юго-запада, из района Средиземного моря.

Таким образом, на основе изложенного можно полагать, что в зимние месяцы тех лет, когда радиус-вектор пересекает меридиан Гринвича в начале года, процессы западной формы будут ослаблены при усилении процессов меридиональной циркуляции формы С.

Возникновение над бассейном Волги при процессах формы С резко выраженной отрицательной аномалии давления и приводит, очевидно, к повышенному выпадению осадков в зимний период и, как следствие, к повышенной влажности года.

Следовательно, в годы, соответствующие максимумам семилетнего цикла в изменениях стока Волги, характер барического поля должен отличаться следующими особенностями: в зимний период в области расположения исландской депрессии над Западной Европой и Арктическим бассейном давление должно повышаться, а над бассейном Камы, Средней и Нижней Волги, южной частью ЕТС и Сибирью — падать. В зимний период тех лет, когда наблюдается понижение стока в семилетнем цикле, картина должна быть обратной.

В общем виде это положение может быть проиллюстрировано результатами дискриминантного анализа осредненных за зиму (январь—март) полей атмосферного давления для периода 1937—1966 гг. Указанный анализ, результаты которого носят предварительный характер, выполнялся авторами совместно с Ю. В. Николаевым для определения различий между двумя классами барических полей, соответствующих годам повышенного и пониженного относительно нормы стока Волги (Николаев и др., 1970).

Поля давления брались по сетке из 12 точек и охватывали зону к северу от 50° с. ш. Основываясь на предположении, что годам повышенного стока Волги соответствует другой характер барического поля, чем годам пониженного, мы разбили указанные барические поля на 2 класса по 7 членов каждый. Один из них включал поля, относящиеся к годам, когда среднегодовой сток Волги был выше нормы (1942, 1947, 1953, 1955, 1958, 1962, 1966 гг.), другой составляли поля, соответствующие годам, когда сток Волги был ниже нормы (1939, 1940, 1944, 1945, 1960, 1963, 1964 гг.). Выбор лет определялся по данным среднегодового притока в Рыбинское водохранилище с 1957 до 1966 г. Такой ряд вполне репрезентативен по отношению к общим колебаниям стока Волги, поскольку отмеченные моменты экстремальных значений стока характерны для всех створов. В то же время указанные годы в основном соответствуют также годам экстремальных значений семилетней вариации в стоке Волги. Затем выполнялся дискриминантный анализ выбранных классов барических полей.

Не останавливаясь на математической постановке задачи дискриминантного анализа, которая подробно описана Ю. В. Николаевым (1969), отметим, что в конечном итоге она сводится к решению уравнения

$$(R^* - \lambda R) U = 0, \quad (1)$$

где R^* — матрица ковариаций между классами; R — матрица ковариаций по всей совокупности многомерных величин; λ — собственные значения; U — собственные векторы.

Для двух классов A и B коэффициенты ковариации между классами можно определить по формуле

$$r_{ij}^* = \frac{P_i(A) P_j(A) + P_i(B) P_j(B) - \bar{P}_i(A) \bar{P}_j(B) - \bar{P}_j(A) \bar{P}_i(B)}{2}, \quad (2)$$

$$i, j = 1, 2, 3, \dots, n,$$

где P_i и P_j — i -й и j -й признаки исследуемых объектов A и B ; n — количество признаков. Черта сверху означает осреднение.

ного вектора U_k . Если различия между классами объективно существуют, то величины P'_k , принадлежащие к различным классам, должны различаться между собой.

В рассматриваемом случае признаки объекта характеризуют его состояние в различных узлах географической сетки и, следовательно, поле выбранного собственного вектора должно отражать тот процесс, которым различаются исследуемые классы. Причем, согласно изложенному, наиболее существенные различия будет отражать поле собственного вектора. Рассматривая с этих позиций поле собственного вектора U_1 , можно видеть, что в данном случае наиболее характерные различия между полями двух классов отражаются в различном состоянии атмосферного

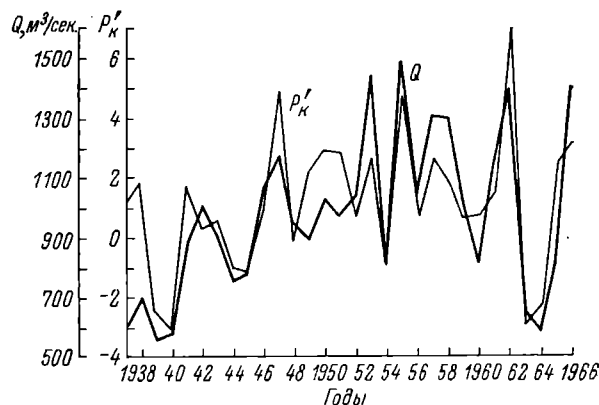


Рис. 9. Сопоставление среднегодовых величин притока вод в Рыбинское водохранилище со значениями P'_k .

давления в двух областях. Одна из них охватывает зону локализации исландского минимума, Северо-Запад Европы и Арктический бассейн, исключая Чукотское море (рис. 8, 1), другая располагается над южной половиной ЕТС, Сибирью, Чукотским и Беринговым морями (рис. 8, 2).

Предположим, что в одну из зим выбранных лет происходит повышение давления в первой зоне и падение во второй. Тогда, определяя по уравнению (4) сумму $U_{ki}P_i$, обозначенную P'_k , получим положительную величину (произведения аномалий давления на значения первого собственного вектора в первой и второй зонах будут положительны). Если же происходит обратный процесс, т. е. наблюдается падение давления в первой зоне и рост во второй, то значение P'_k , очевидно, будет отрицательным.

Выполнив такие вычисления для каждого года анализируемого ряда, мы сопоставили полученные значения P'_k с величинами среднегодового притока вод в Рыбинское водохранилище (рис. 9). Оказалось, что характер изменения величины P'_k согласуется с многолетним ходом среднегодового притока вод в Рыбинское водохранилище, причем максимальный приток соответствует наибольшим положительным значениям P'_k , а минимальный — отрицательным. Отсюда следует, что повышенный приток в Рыбинское водохранилище, а следовательно, и повышенный сток Волги наблюдаются, очевидно, в те годы, когда зимой происходит заполнение исландской депрессии и рост давления над Северо-Западом Европы и Арктическим бассейном, в то время как над южной половиной ЕТС, преимущественно в бассейне Камы и Нижней Волги, и Азиатским материком давление падает.

Коэффициенты корреляции повторяемости форм циркуляции в зимний период с семилетними колебаниями стока Волги (1903—1959 гг.)

Река — пункт	τ (годы)										
	0.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ф о р м а W											
Волга — Ярославль	-0.22	0.01	0.21	0.24	0.08	-0.08	-0.32	-0.25	-0.17	0.08	0.35
Ока — Горбатов	-0.27	-0.09	0.31	0.49	0.22	-0.36	-0.42	-0.17	0.13	0.13	-0.07
Волга — Горький	-0.24	-0.04	0.28	0.41	0.19	-0.31	-0.47	-0.27	0.01	0.16	0.24
Кама — Пермь	0.12	-0.10	-0.14	0.05	0.15	0.10	-0.32	-0.25	0.00	0.20	0.39
Волга — Куйбышев	-0.10	0.10	0.44	0.30	-0.09	-0.30	-0.30	-0.01	0.18	0.03	0.01
Ф о р м а С											
Волга — Ярославль	0.12	0.20	0.07	-0.06	-0.18	-0.15	0.07	0.15	0.11	-0.02	-0.03
Ока — Горбатов	0.38	0.07	-0.33	-0.40	-0.03	0.31	0.31	-0.13	-0.44	-0.04	0.20
Волга — Горький	0.33	0.09	-0.28	-0.37	-0.10	0.26	0.31	-0.05	-0.31	-0.03	0.14
Кама — Пермь	0.27	0.47	0.24	-0.28	-0.65	-0.38	0.11	0.30	0.25	0.11	-0.07
Волга — Куйбышев	0.51	0.26	-0.28	-0.50	-0.28	0.17	0.30	-0.01	-0.21	0.03	0.09
Ф о р м а Е											
Волга — Ярославль	0.09	-0.24	-0.34	-0.31	0.11	0.15	0.29	0.27	0.05	-0.22	-0.38
Ока — Горбатов	0.11	0.11	-0.08	-0.30	-0.26	0.06	0.27	0.32	0.06	-0.22	-0.05
Волга — Горький	0.06	-0.03	-0.16	-0.30	-0.17	0.16	0.34	0.47	0.09	-0.31	-0.29
Кама — Пермь	-0.46	-0.27	-0.08	0.15	0.31	0.24	0.19	0.02	-0.12	-0.29	-0.09
Волга — Куйбышев	-0.24	-0.10	-0.03	-0.08	0.02	0.19	0.29	0.25	-0.07	-0.35	-0.08

Подобная картина возникает, на наш взгляд, под влиянием силы деформации в годы, когда радиус-вектор пересекает меридиан Гринвича в зимние месяцы. В результате происходит нарушение зональности атмосферной циркуляции и развиваются меридиональные процессы формы С, которые и приводят в силу своих особенностей к повышенному стоку рек волжского бассейна в данном году.

Для подтверждения высказанных положений были рассчитаны взаимокорреляционные функции со сдвигом τ от 0 до 10 лет между повторяемостью форм циркуляции W, C и E в зимний период и стоковыми рядами на створах Волги, Оки и Камы. Предварительно осуществлялась фильтрация коррелируемых рядов с применением полосового фильтра «3-7».

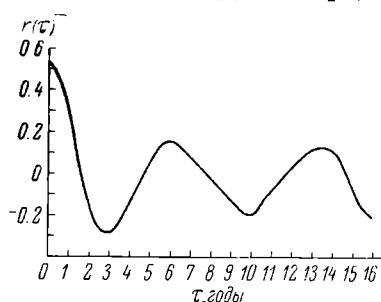


Рис. 10. Взаимокорреляционная функция между январскими значениями координаты X полюса вращения и аномалиями среднегодовых расходов Волги у Куйбышева (фильтр «3-7»).

Как показывают результаты анализа (табл. 3), амплитуды вычисленных корреляционных функций невелики, однако ход функций и характер связи достаточно определенно свидетельствуют о том, что максимальные амплитуды семилетней вариации в изменениях стока Волги наблюдаются в годы, когда в зимний период преобладают процессы меридиональной циркуляции формы С. Особенно отчетливо это проявляется в изменениях стока Камы и Нижней Волги, причем максимум стока Камы наступает годом позже. В то же время понижение стока, судя по данным анализа, связано с увеличением повторяемости форм W и E, причем наиболее характерным является наличие обратной

связи между колебаниями стока Камы и повторяемостью в зимний период формы E.

Таким образом, обобщая приведенные результаты, можно в общих чертах представить следующую картину возникновения шести-семилетнего цикла в многолетних изменениях стока рек волжского бассейна. В результате движения полюса Земли с периодом около 14 месяцев радиус-вектор пересекает меридиан Гринвича в один и тот же момент времени 1 раз в течение 7 лет. Область всей Северной Атлантики и Западной Европы радиус-вектор проходит примерно в течение 2 месяцев. Вследствие этого, если считать, что в первом году цикла данное явление наблюдается в ноябре—декабре, то в следующем году оно будет иметь место в январе—феврале, а в целом радиус-вектор будет пересекать район Северной Атлантики и Западной Европы в зимнюю половину года примерно в течение 3 лет. В течение 3 последующих лет это явление будет наблюдаться в летнюю половину года.

В соответствии с изложенным в первые 3 года цикла будет отмечаться повышение давления в зимние месяцы над областью расположения исландской депрессии и Западной Европой и преобладание процессов меридиональной циркуляции формы С. В результате над бассейном Волги и особенно Камы формируется резко выраженная отрицательная аномалия давления, наличие которой приведет, по-видимому, к увеличению выпадения осадков в зимний период и, как следствие, к повышенному стоку рек волжского бассейна. Спустя 3 года описанные процессы пойдут в обратном направлении и соответственно сток рек бассейна Волги понизится.

В определенной степени приведенные положения подтверждаются наличием шести-семилетнего цикла в ходе корреляционной функции, рассчитанной между январскими значениями координаты X и среднегодовыми расходами Волги у Куйбышева, отфильтрованными с применением

фильтра «3-7» (рис. 10). Подобная цикличность обнаруживается и в ходе корреляционных функций повторяемости форм циркуляции W и C в зимнее время со стоком рек бассейна Волги (табл. 3).

В заключение следует отметить, что изложенные результаты представляют лишь попытку объяснения возникновения шести-семилетней цикличности в многолетних изменениях речного стока. Для более детального изучения этого вопроса необходимо прежде всего исследовать основные закономерности 14-месячной барической волны «полюсного прилива» на всем полушарии, изучить глобальные закономерности шести-семилетних вариаций в изменениях атмосферного давления и характер преобразования зональной циркуляции в процессы меридиональных форм.

Результаты подобных исследований в совокупности с результатами глобального анализа многолетних колебаний стока рек северного полушария будут способствовать более ясному пониманию природы шести-семилетней цикличности в многолетних изменениях речного стока.

ЛИТЕРАТУРА

- Гирс А. А. 1960. Основы долгосрочных прогнозов погоды. Л.
- Дружинин И. П., З. П. Коноваленко, В. П. Кукушкина, И. В. Хамьянова. 1966. Речной сток и геофизические процессы (связи, цикличность, предвидение). М.
- Калинин Г. П., А. И. Давыдова. 1968. Циклические колебания стока рек северного полушария. В кн.: Проблемы речного стока. Изд. МГУ.
- Максимов И. В. 1953. Движение полюса Земли и изменения континентальности климата Западной Европы. ДАН СССР, т. 93, № 5.
- Максимов И. В. 1956. Нутационная стоячая волна в Мировом океане и ее географические последствия. Изв. АН СССР, сер. геогр., № 1.
- Максимов И. В., Н. П. Смирнов. 1965. Опыт построения долгосрочного прогноза основных форм атмосферной циркуляции в северном полушарии компонентно-гармоническим методом. Тр. Аркт. и Антарк. инст., т. 262.
- Мусаелян С. М. 1966. Цикличность стока снегового половодья рек Армянской ССР. Тр. Закавказск. гидрометеорол. инст., вып. 20.
- Николаев Ю. В. 1969. Преобразование информации в приложении к задачам гидрометеорологии.
- Николаев Ю. В., Э. И. Саруханян, Н. П. Смирнов. 1970. О применении дискриминантного анализа при определении различий между классами. Информ. бюлл. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, № 8.
- Саруханян Э. И. 1969. «Полюсный прилив» в Мировом океане. ДАН СССР, т. 188, № 3.
- Смирнов Н. П., Э. И. Саруханян, О. Ф. Кондрацова. 1970. Многолетние колебания стока Волги и их возможные причины. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 20 (23).
- Филоненко П. П. 1967. О цикличности стока рек Балхаш-Алапольской впадины. В кн.: Проблемы физической, экономической и медицинской географии Казахстана. Алма-Ата.
-

**ДВУХЛЕТНИЕ ЦИКЛИЧЕСКИЕ КОЛЕБАНИЯ
СТОКА ВОЛГИ**

В последние годы внимание исследователей обращено на изучение двухлетней цикличности в колебаниях гидрометеорологических процессов. Это связано с обнаружением двухлетнего колебания в стратосферных ветрах, которое, по мнению известного советского метеоролога Т. В. Покровской (1969), относится к самым замечательным открытиям в метеорологии за последнее десятилетие.

Согласно опубликованным исследованиям (Reed a. oth., 1961; Veryard, Ebdon, 1961; Дубенцов, 1963; Кац, 1968, и др.), в узкой экваториальной полосе на высоте 18—40 км в течение примерно года господствуют восточные ветры, которые в следующем году замещаются западными потоками. Длительность отдельных полных периодов этого цикла отлична от двух лет и, по данным большинства исследователей, в 1955—1967 гг. изменялась в диапазоне 21—33 месяца. Установлено, что в умеренных широтах колебание лучше выражено в тропосфере, а не в стратосфере (Покровская, 1969).

Очень важным является вопрос об устойчивости таких колебаний. Некоторые авторы не исключают возможности исчезновения цикла в дальнейшем, что в какой-то степени подтверждается увеличением периода цикла после 1963 г. (Wallace, 1966).

В связи с этим большой интерес представляет исследование двухлетней цикличности в ходе гидрометеорологических процессов, наблюдения за которыми ведутся в течение длительного времени.

Двухлетняя цикличность в ходе изменений некоторых метеорологических элементов была обнаружена задолго до ее открытия в стратосферных процессах. Еще в конце прошлого века были опубликованы работы Г. Клайтона (Clayton, 1885), А. И. Воейкова (1891), Э. Ф. Лесгафта (1899), посвященные этому вопросу. Так, А. И. Воейков установил чередование теплых и холодных, многоснежных и малоснежных зим на севере Европы, а Э. Ф. Лесгафт показал чередование из года в год двух типов циклонических траекторий в Северной Атлантике. Затем более чем полстолетия эта закономерность в ходе метеорологических процессов почти не привлекала внимания исследователей. Видимо, это было связано с тем, что двухлетний цикл не проявляет себя как строгое периодическое колебание, а является, как уже указывалось, квазипериодическим. Кроме того, выражен он не везде, а причины его возникновения были неизвестны.

В 20-х годах появились работы Г. Клафа (Clough, 1924, 1928), который на основе анализа обширных материалов по температуре и давлению воздуха на станциях Европы и Северной Америки пришел к выводу о на-

личии устойчивого 28-месячного цикла. При этом он установил, что это колебание распространяется по территории США с севера на юг.

Значительно позднее Н. А. Белинский (1957), рассматривая колебания многолетних изменений цикло- и антициклонической деятельности, пришел к выводу, что двухлетняя цикличность в ходе атмосферных процессов действительно реально существует и играет в их развитии определенную роль.

Попыткой привлечь внимание к этому интересному природному явлению была работа Т. В. Покровской (1959). На основе анализа температурных условий в Ленинграде автор показал, что в чередовании лет с относительно высокими и низкими температурами наблюдается двухлетняя цикличность.

В последнее десятилетие круг работ по проблеме значительно расширился. Опубликован ряд работ, посвященных изучению этого цикла в ходе различных показателей климата и погоды. Так, Г. Ландсберг с соавторами (Landsberg a. oth., 1963), применив метод фильтрации к исходным данным, пришел к выводу о наличии цикла с периодом около двух лет в атмосферных процессах на севере Европы. При этом во второй половине XIX в. двухлетняя цикличность, как оказалось, была выражена значительно лучше, чем в первой половине XX в. Возможно, это и явилось причиной ослабления интереса к данному природному явлению.

М. Х. Байдал (1967) обнаружил двухлетнюю цикличность в местоположении циркуляционного полюса, что, по мнению автора, является непосредственной причиной двухлетних циклов в сезонных гидрометеорологических процессах. М. Х. Байдалом, в частности, отмечается двухлетняя цикличность в изменениях объема летнего стока некоторых горных рек Казахстана. Одновременно Р. В. Абрамов (1967) показал наличие этого цикла в изменениях морфометрических характеристик исландского минимума давления. Несколько позднее П. Райт (Wright, 1968) установил наличие двухлетних колебаний в нижней атмосфере над большей частью земного шара. По результатам его исследований, эти колебания в северном полушарии наиболее заметно проявляются с мая по август, однако двухлетний цикл выражен не во все годы достаточно отчетливо. В отдельные небольшие периоды двухлетний цикл может исчезать или даже менять фазу. В связи с этим интересен вывод Т. В. Покровской (1969), которая, изучая устойчивость двухлетних колебаний годовой температуры в северном полушарии за 1921—1940 гг., установила, что наибольшей устойчивостью проявления двухлетнего цикла отличаются северо-западные районы Европы.

Таким образом, можно считать, что двухлетний ритм является реальной особенностью изменчивости метеорологических процессов на Земле.

Естественно предположить, что в колебаниях стока рек, обусловленных прежде всего колебаниями погодных характеристик, которые непосредственно связаны с изменениями циркуляционных процессов в тропосфере, также должен проявляться заметный двухлетний ритм. Однако до сих пор, насколько нам известно, исследований, посвященных двухлетней цикличности в колебаниях стока рек, не проводилось. Между тем величина стока крупной реки обуславливается рядом метеорологических факторов над значительной территорией (бассейном реки), вследствие чего она является хорошим интегрирующим климатическим показателем для бассейнов исследуемых рек. Это и позволяет рассматривать на основе анализа колебаний стока вопросы, связанные с устойчивостью циклических колебаний во времени и пространстве. Кроме того, поскольку сток играет исключительную роль в народном хозяйстве, исследование его колебаний с двухлетним циклом, так же как и других циклических

Таблица 1

Данные об используемых рядах и створах в бассейне Волги

Река — пункт наблюдений	Период наблюдений (число лет)	Площадь водосбора, км ²	Средний расход, м ³ /сек.
Волга — Старица	1891—1965 (75)	21100	125
Волга — Ярославль	1877—1963 (87)	154000	1090
Унжа — Макарьев	1896—1965 (70)	18500	158
Волга — Горький	1877—1965 (89)	479000	2780
Ока — Муром	1882—1965 (84)	188000	915
Москва — Звенигород	1924—1965 (42)	5000	32.2
Клязьма — Павловский Посад	1920—1965 (46)	5440	31.1
Кама — Пермь	1881—1964 (84)	169000	1630
Белая — Уфа	1878—1964 (87)	100000	744
Вятка — Вятские Поляны	1920—1964 (45)	124000	828
Волга — Куйбышев	1877—1964 (88)	1200000	7760
Волга — Волгоград	1879—1964 (86)	1360000	8060

вариаций, имеет большое значение для целей долгосрочного прогноза объема стока.

Материалом для настоящего исследования послужили данные о расходах воды на некоторых створах Волги и ее главных притоков. Из «Гидро-

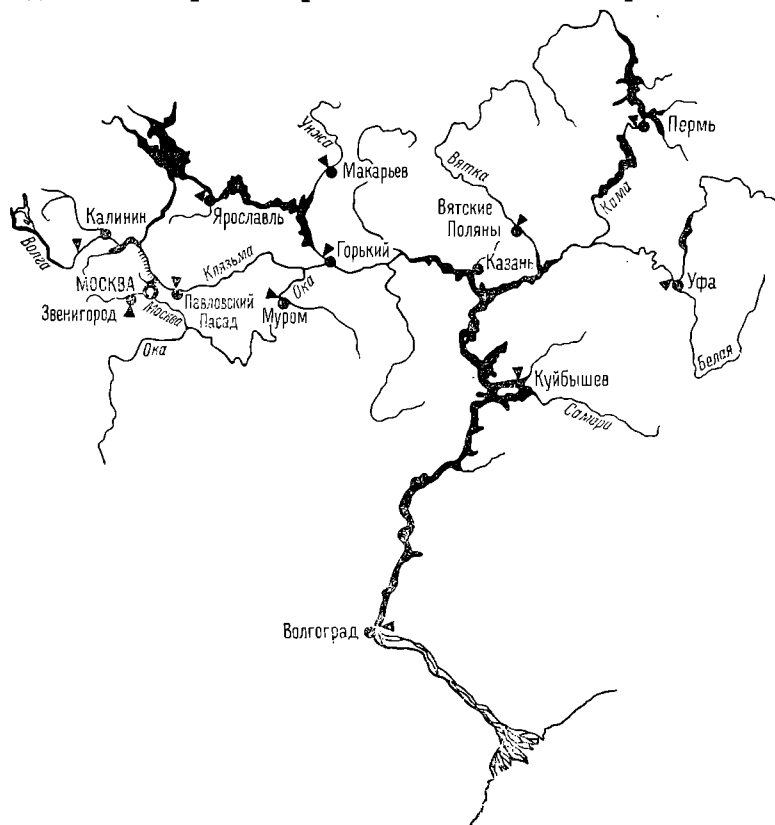


Рис. 1. Схема расположения створов в бассейне Волги.

логических ежегодников» выбирались только те створы, длительность наблюдений на которых была более 40 лет. Таких створов оказалось 12. Их расположение показано на рис. 1, а гидрометрические характеристики приведены в табл. 1.

В перечисленных работах, посвященных исследованию двухлетней цикличности в атмосферных процессах, использовались различные методы анализа. Наиболее простыми, но вместе с тем позволяющими отыскать самые общие закономерности в колебаниях природных процессов, являются метод скользящего осреднения по соответствующему количеству членов ряда и метод подсчета итераций. В частности, последний был использован в работе Р. В. Абрамова (1967), где итерациями (повторностями) названа последовательность одинаковых знаков в тенденции рассматриваемой кривой. Ежегодная смена знака дает одночленные итерации, которые соответствуют двухлетней периодичности, двухчленные — трех-четырехлетней периодичности, и т. д. При случайном распределении изменчивости ряда одночленные итерации составляют 50% от их общего числа, двухчленные — 25%, трехчленные — 12.5%, и т. д. Если подсчитать количество итераций различного порядка на кривых многолетнего изменения стока и отнести их к соответствующим случайным уровням, получим представление о преобладании в натурных рядах того или иного ритма.

Применение к анализу стоковых рядов даже этого довольно грубого метода показывает, что в стоке Волги преобладающим ритмом являются двух-трехлетние колебания (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Отношение действительных итераций к случайным

Река — пункт наблюдений	Порядок итераций			
	1-я	2-я	3-я	4-я
Волга — Старица	0.88	1.32	1.20	0.80
Волга — Ярославль	1.20	1.24	0.40	0.32
Унжа — Макарьев	1.28	1.12	0.32	0.64
Волга — Горький	0.94	1.48	0.08	0.64
Ока — Муром	1.18	1.04	1.04	0.32
Москва — Звенигород	1.22	1.08	0.64	0.64
Клязьма — Павловский Посад . .	1.38	1.00	0.24	0.48
Кама — Пермь	1.34	0.96	0.72	0
Белая — Уфа	1.14	1.08	0.32	1.28
Вятка — Вятские Поляны . . .	1.12	1.32	0.52	0.64
Волга — Куйбышев	0.94	1.36	0.89	0.64
Волга — Волгоград	0.98	1.36	0.72	0.64
Среднее по бассейну . . .	1.13	1.20	0.59	0.59

Как было показано авторами ранее (Смирнов и др., 1970), в колебаниях стока Волги присутствует целый ряд циклических вариаций и при исследовании каждой отдельно взятой вариации возникает необходимость выделить ее, подавив в какой-то степени вариации с другими периодами. Этой цели служат различного рода фильтры. В нашем случае для фильтрации низкочастотных колебаний мы воспользовались скользящим осреднением. Из среднегодовых значений расходов воды вычитались трехлетние скользящие средние. Полученные таким образом значения расходов для некоторых створов приведены на рис. 2.

Результаты подсчета количества итераций по фильтрованным рядам (табл. 3) еще с большей наглядностью свидетельствуют о реальном существовании двухлетнего ритма в стоке Волги: одночленные итерации и на семи створах двухчленные лежат гораздо выше случайного уровня.

Отношение действительных итераций к случайным по фильтрованным рядам.
Фильтр «1-3»

Река — пункт наблюдений	Порядок итераций			
	1-я	2-я	3-я	4-я
Волга — Старица	1.46	1.00	0.16	0
Волга — Ярославль	1.42	0.96	0.40	0
Унка — Макарьев	1.30	1.32	0.16	0
Волга — Горький	1.18	1.44	0.40	0
Ока — Муром	1.42	0.88	0.40	0.32
Москва — Звенигород	1.36	1.12	0.32	0
Клязьма — Павловский Посад . .	1.48	1.04	0	0
Кама — Пермь	1.44	0.92	0.40	0
Белая — Уфа	1.34	1.12	0.24	0.32
Вятка — Вятские Поляны	1.14	1.44	0.56	0
Волга — Куйбышев	1.22	1.36	0.24	0.32
Волга — Волгоград	1.22	1.48	0.16	0
Среднее по бассейну	1.33	1.17	0.29	0.08

С целью более подробного исследования двухлетнего цикла в стоке Волги, а именно: определения периода колебаний, амплитуды и фазных закономерностей по бассейну, были использованы среднемесячные значения расходов, которые подвергались спектральному и периодограммному анализу. Для исключения сезонного хода и низкочастотных вариаций исследуемые ряды предварительно фильтровались. Фильтрация выполнялась, как и в первом случае, с помощью скользящего осреднения: из средних скользящих значений

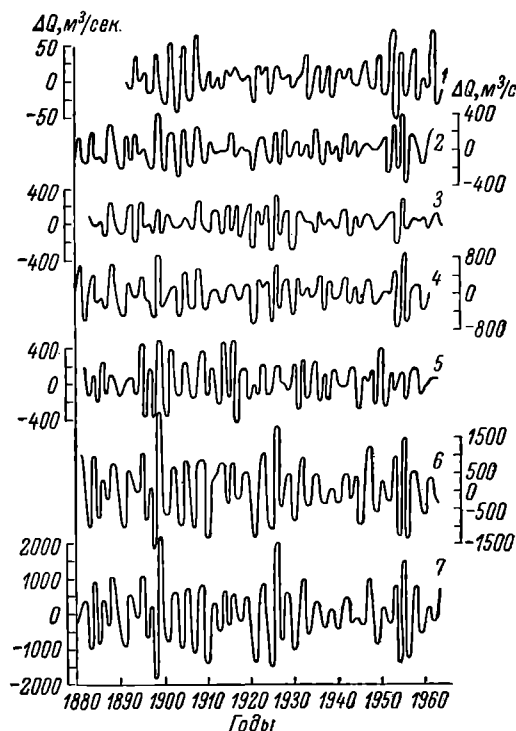


Рис. 2. Многолетние изменения фильтрованных значений расходов воды на створах, расположенных у разных городов.

1 — Старица, 2 — Ярославль, 3 — Муром, 4 — Горький, 5 — Пермь, 6 — Куйбышев, 7 — Волгоград.

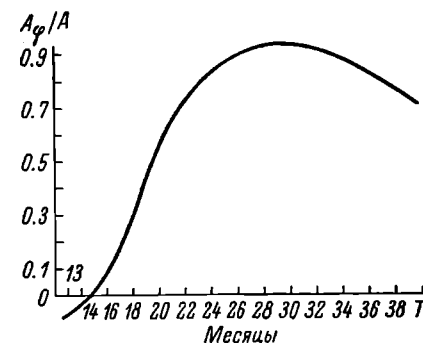


Рис. 3. Частотная характеристика фильтра «13-37».

расходов за 13 месяцев вычитались средние скользящие за 37 месяцев. Частотная характеристика такого фильтра представлена на рис. 3.

Все расчеты производились на ЭВМ «Наири». В связи с ограниченной памятью машины анализу подвергались данные о расходах только за последние 58 лет, при этом спектральная плотность вычислялась отдельно для двух периодов — с 1907 по 1938 и с 1934 по 1965 г. — по 350 отфильтрованным членам, каждый с перекрытием в 40 членов.

Таблица 4

Длительность двухлетнего цикла (в месяцах)

Река — пункт наблюдений	Спектральный анализ		Периодограммный анализ
	1907—1938 гг.	1934—1965 гг.	1907—1965 гг.
Волга — Старица	28	30	29
Волга — Ярославль	29	25	29
Унка — Макарьев	27	33	29
Волга — Горький	28	26	29
Ока — Муром	29	27	29
Москва — Звенигород	—	29	29
Клязьма — Павловский Посад	—	25	29
Кама — Пермь	29	25	27
Белая — Уфа	32	28	30
Вятка — Вятские Поляны	—	26	26
Волга — Куйбышев	33	26	29
Волга — Волгоград	32	26	29
Средний период	30	27	29

Как видно из рис. 4, двухлетний цикл выражен очень четко во всех исследуемых рядах. Его продолжительность колеблется в пределах 25—33 месяца и в среднем для 1907—1965 гг. равна 29 месяцам (табл. 4). Важно отметить, что данные анализа указывают на уменьшение длительности периода двухлетнего цикла с 30 месяцев в 1907—1938 гг. до 27 месяцев в 1934—1965 гг. Максимум спектральной плотности выделенного цикла за редким исключением превышает уровень 99%-й обеспеченности и во всех случаях лежит значительно выше 95%-го уровня.

Величина амплитуды двухлетнего цикла в среднем по всему бассейну за весь рассмотренный период составляет примерно 18% от абсолютной амплитуды исследуемых рядов (табл. 5). Данные таблицы говорят о некотором увеличении амплитуды выделенного цикла с северо-востока на юго-запад, однако эта тенденция выражена очень слабо.

Если рассматривать изменения амплитуд двухлетнего цикла во времени по отдельным створам (рис. 2), можно отметить, что в некоторые моменты времени амплитуды возрастают в два раза и более по сравнению с их средними значениями, а в другие, наоборот, значительно уменьшаются. Создается впечатление, что временами происходит резкое усиление двухлетней периодичности в колебаниях стока, а иногда наблюдается почти полное ее исчезновение. При этом моменты усиления и затухания цикла по всему бассейну наступают примерно в одно и то же время, приблизительно через каждые 25—30 лет. Последнее усиление двухлетней периодичности в колебаниях стока Волги наблюдалось в 50-е годы.

Анализ фазных закономерностей проявления двухлетней цикличности в бассейне Волги указывает на закономерное изменение фазы с северо-востока на юго-запад (рис. 5). Раньше всего максимум стока в двухлетней волне наступает в бассейнах Камы, Вятки, Унжи и только через 5—7 месяцев он отмечается в стоке бассейна Оки.

Таким образом, следует подчеркнуть, что квазидвухлетний ритм, период которого в 1907—1965 гг. в среднем составлял 29 месяцев, а за

Амплитуды (А) и фазы (φ) 29-месячных колебаний в стоке Волги за 58 лет (1908—1965)

Река — пункт наблюдений	А, м ³ /сек.	$\frac{A}{A_{абс.}}$, %	φ°*
Волга — Старица	18	17	151
Волга — Ярославль	110	19	171
Ужга — Макарьев	15	13	185
Волга — Горький	224	17	160
Ока — Муром	99	22	110
Москва — Звенигород	5.4	30	146
Клязьма — Павловский Посад	3.2	19	148
Кама — Пермь	128	18	197
Белая — Уфа	60	11	200
Вятка — Вятские Поляны	50	13	232
Волга — Куйбышев	651	19	151
Волга — Волгоград	471	13	151

* Фазы приведены к январю 1910 г.

последние 30 лет — 27 месяцев, является одним из основных колебаний, формирующих многокомпонентную систему стока в бассейне Волги. Его вклад в общую изменчивость стока за рассматриваемый период в среднем составил около $\frac{1}{5}$ всей величины. При этом в отдельные моменты роль двухлетнего цикла в общей изменчивости стока может значительно возрастать и, напротив, в другие периоды он не оказывает сколько-нибудь заметного воздействия на общую изменчивость стока во времени.

Естественно, возникает вопрос, насколько наличие исследуемой вариации в стоке Волги связано с квазидвухлетним стратосферным циклом.

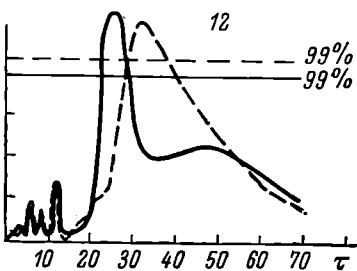
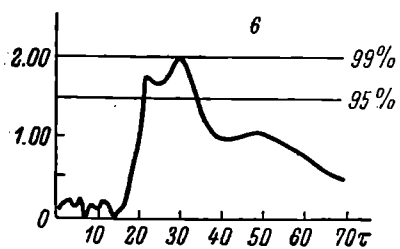
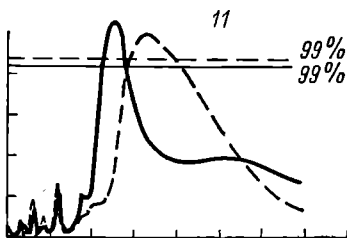
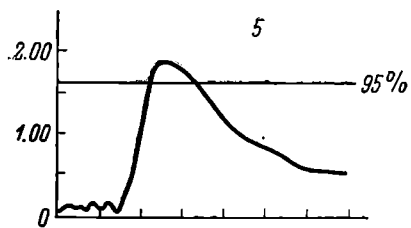
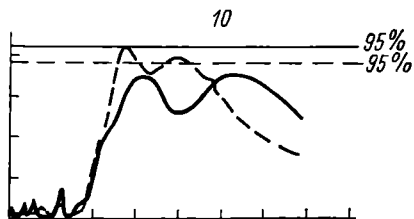
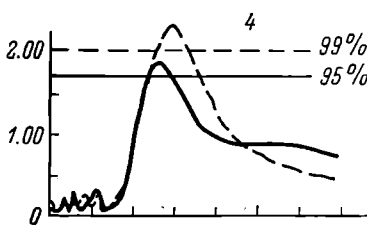
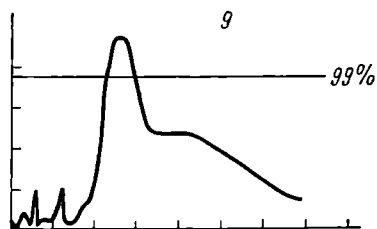
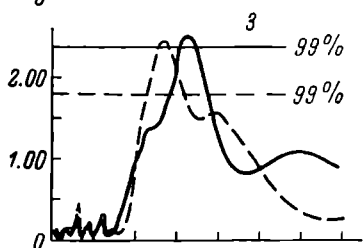
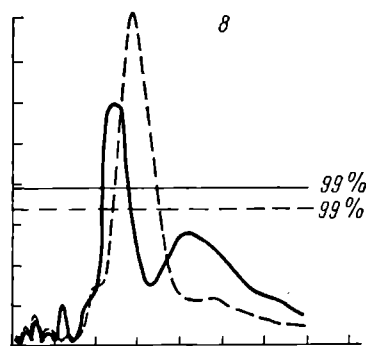
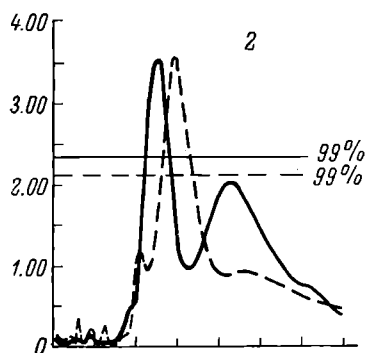
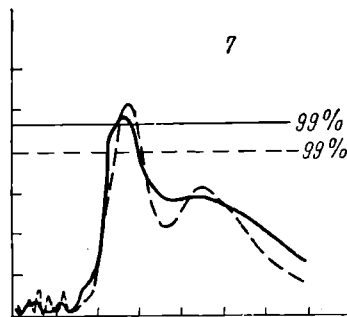
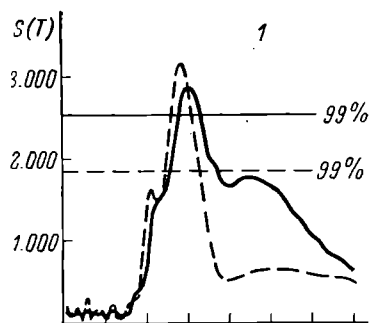
Как указывает А. И. Угрюмов (1968), первой попыткой непосредственного сравнения фазы экваториального цикла с погодой в Европе была работа К. Лабитцке. При анализе стратосферных процессов за 1958—1961 гг. было обнаружено, что западному потоку в экваториальной стратосфере соответствует экстремально теплое европейское лето, а восточному — холодное и влажное.

Позднее, изучая характер перераспределения воздушных масс, А. Л. Кац (1964) установил, что зимние месяцы с господствующим западным экваториальным стратосферным течением, наступающие через год после зимних месяцев с восточным потоком, по сравнению с первыми должны характеризоваться относительным повышением давления в высоких широтах, значительным ослаблением интенсивности зональной и относительным усилением интенсивности меридиональной циркуляции в умеренных широтах. При наступлении месяцев с господствующим восточным стратосферным экваториальным течением через год после месяцев с западным потоком должно наблюдаться обратное явление.

Подтверждение этого вывода было получено В. Бёме (Böhme, 1967), который показал, что при максимальном развитии восточных ветров в стратосфере экваториальной зоны в Европе наблюдается минимум меридиональности. Максимуму повторяемости меридиональных процессов соответствует период смены ветра в экваториальной стратосфере с западного на восточный. В. Бёме отметил, что эту связь можно рассма-

Рис. 4. Спектрограммы расходов воды на створах у разных городов.

1 — Старица, 2 — Ярославль, 3 — Макарьев, 4 — Муром, 5 — Павловский Посад, 6 — Звенигород, 7 — Горький, 8 — Пермь, 9 — Вятские Поляны, 10 — Уфа, 11 — Куйбышев, 12 — Волгоград. Сплошная линия — 1907—1938 гг., прерывистая — 1934—1965 гг.



тривать как соответствие экваториального цикла двухлетнему циклу в изменчивости метеорологических элементов в Европе.

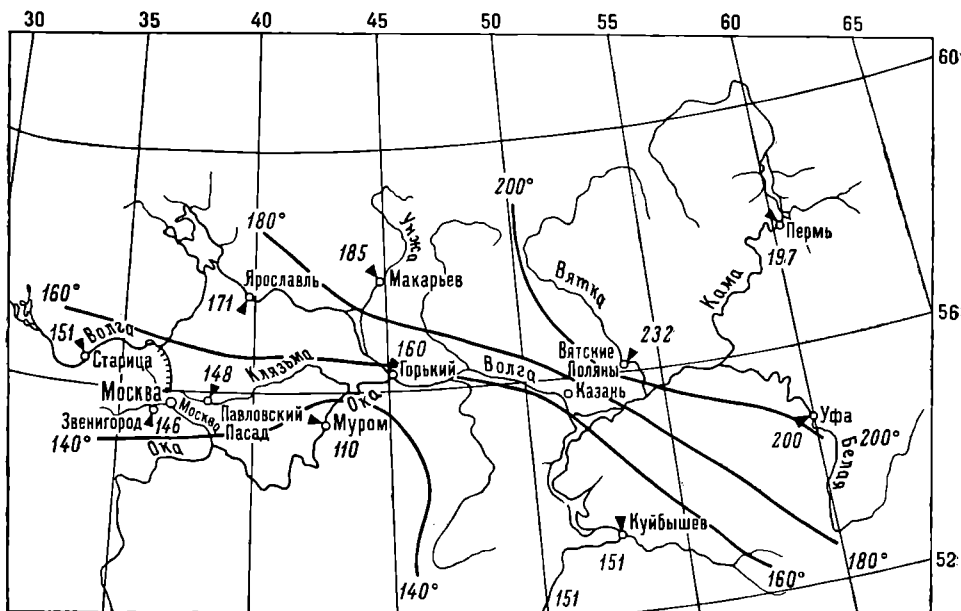


Рис. 5. Распределение фаз 29-месячных колебаний по бассейну Волги.

В работе А. И. Угрюмова (1968) исследуется двухлетняя цикличность в тропосфере умеренных широт северного полушария. Автором на основе данных за 1959—1968 гг. получено количественное выражение связи

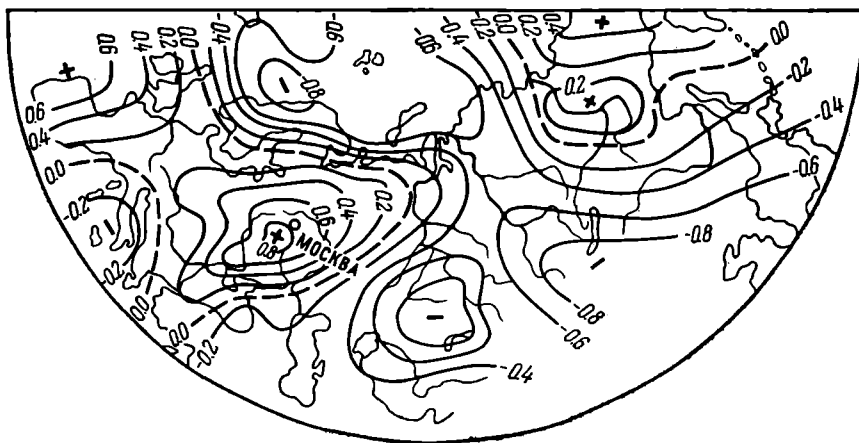


Рис. 6. Карта изокоррелят для межгодовых изменений I_{m10} и среднемесячного давления в июне (по Угрюмову, 1968).

между проявлениями двухлетней цикличности в тропосфере и стратосфере. На рис. 6, заимствованном из указанной работы А. И. Угрюмова, представлена карта изокоррелят стратосферного индекса I_{m10} (средняя величина индекса меридиональности циркуляции на уровне 10 мб) за месяц, предшествующий перестройке барического поля стратосферы, с ходом среднего месячного давления в июне. Если предположить, что ха-

рактер распределения зависимости стратосферных и тропосферных процессов по территории сохраняется и для других месяцев года, то необходимо признать, что ход давления над бассейном Волги в значительной степени зависит от перестройки стратосферной циркуляции в экваториальной зоне. При этом должно наблюдаться двухлетнее чередование повторяемости зональных и меридиональных процессов в этом районе.

Важно подчеркнуть вывод А. И. Угрюмова о том, что если изменения стратосферного индекса $I_{\text{м10}}$ невелики, то в двух и более смежных годах могут повторяться циркуляционные условия, что неизбежно приводит к нарушению двухлетней цикличности в ходе элементов погоды и климата.

Установленные закономерности влияния стратосферной циркуляции на тропосферу в умеренных и высоких широтах позволяют объяснить квазидвухлетнюю периодичность повторяемости форм атмосферной циркуляции, на существование которой, как уже указывалось, обратил внимание Р. В. Абрамов (1967).

Таким образом, имеются все основания считать, что двухлетняя цикличность в колебаниях стока Волги есть отражение подобной закономерности в изменениях атмосферных циркуляционных процессов в умеренных широтах северного полушария.

ЛИТЕРАТУРА

- А б р а м о в Р. В. 1967. Двухгодичный ритм в гидрометеорологических явлениях Северо-Атлантического региона. Тр. Лен. гидрометеорол. инст., вып. 24.
- Б а й д а л М. Х. 1967. Современное состояние и перспективы развития комплексного макроциркуляционного метода долгосрочных прогнозов погоды. Тр. Казахск. НИГМИ, вып. 26.
- Б е л и н с к и й Н. А. 1957. Использование некоторых особенностей атмосферных процессов для долгосрочных прогнозов. Л.
- В о е й к о в А. И. 1891. Чередование теплых и холодных зим. Метеорол. вестн., № 9.
- Д у б е н ц о в В. Р. 1963. О некоторых особенностях циркуляции в тропосфере вблизи экватора. Метеорол. и гидрол., № 12.
- К а ц А. Л. 1964. Двухлетняя цикличность в экваториальной стратосфере и общая циркуляция атмосферы. Метеорол. и гидрол., № 6.
- К а ц А. Л. 1968. Циркуляция в стратосфере и мезосфере. Л.
- Л е с г а ф т Э. Ф. 1899. Влияние температуры Гольфстрима на общий ход атмосферной циркуляции в Европе в зимнее время. Изв. Русск. геогр. общ., т. 35.
- П о к р о в с к а я Т. В. 1959. О двухлетней цикличности в ходе метеорологических явлений. Тр. Главн. геофиз. observ., вып. 89.
- П о к р о в с к а я Т. В. 1969. Синоптико-климатологические и гелиогеофизические долгосрочные прогнозы погоды. Л.
- С м и р н о в Н. П., Э. И. С а р у х а н я н, О. Ф. К о н д р а ц о в а. 1970. Многолетние колебания стока Волги и их возможные причины. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 20 (23).
- У г р ю м о в А. И. 1968. Двухлетняя цикличность в тропосфере умеренных широт северного полушария. Метеорол. и гидрол., № 12.
- B ö h m e W. 1967. A change of circulation pattern in middle latitudes in connection with 26-month cycle. В кн.: Динамика крупномасштабных атмосферных процессов. Изд. «Наука», М. (Тр. междунар. симпозиума).
- Clayton H. 1885. A lately discovered meteorological cycle. Amer. Meteorol. Journ. vol. 1.
- C l o u g h H. W. 1924. A systematically varying period with an average length of 28-month in weather and Solar phenomena. Mon. Weather Rev., vol. 52, No 9.
- C l o u g h H. W. 1928. The 28-month period in solar activity and corresponding periods in magnetic and meteorological data. Mon. Weather Rev., vol. 56, No 7.
- L a n d s b e r g H. E., J. M. M i t c h e l l, H. L. C r u t c h e r, F. F. Q u i n l a n. 1963. Surface sings of the biennial atmospheric pulse. Mon. Weather Rev., vol. 91, No 10—12.
- R e e d R. I., W. I. C a m b e l l, Z. A. R a s s m u s s e n and D. G. R o g e r s. 1961. Evidence of downward propagating annual wind reversal in the equatorial stratosphere. Journ. of Geophys. Res., vol. 66, No 3.
- V e r y a r d R. G., R. A. E b d o n. 1961. Fluctuations in tropical stratospheric Winds. Meteorol. Mag., vol. 90, No 1066.
- W a l l a c e J. M. 1966. Long period wind fluctuations in the tropical stratosphere. Rept. Mass. Inst. Technol., Dept. Meteorol., vol. 10, N 19.
- W r i g h t P. B. 1968. A widespread biennial oscillation in the troposphere. Weather, vol. 23, N 12.

ОПЫТ РАСЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ ВЕТРОВЫХ ТЕЧЕНИЙ НА БОЛЬШОМ МЕЛКОВОДНОМ ВОДОЕМЕ

Динамические процессы, происходящие в водоемах (течения, турбулентное перемешивание, волнения), играют основную роль в формировании их режима. Исследование этих процессов, в частности течений, требует длительных синхронных наблюдений в различных частях водоема. Постановка таких наблюдений связана с привлечением большого количества специалистов, оборудования, плавсредств. В связи с этим в настоящее время делаются попытки получения схем течений расчетным путем. Однако в виду сложности структуры течений в естественных водоемах и трудности решения исходных гидродинамических уравнений вопросы, связанные с расчетом течений в реальных водоемах, разработаны недостаточно.

Существующие методы расчета плана течений в прудах-охладителях и водохранилищах (Бернадский, 1933; Караушев, 1960) либо не учитывают основных факторов (действие ветра, рельеф дна, поступление приточных вод), определяющих формирование течений в водоеме, либо дают расчет для узловой вертикали водоема, а не для всей его акватории.

Наиболее фундаментальные теоретические исследования, доведенные до возможности их практической реализации, выполнены по теории морских течений. При этом, очевидно, наиболее перспективным является направление с введением в теорию установившихся течений метода полных потоков с последующим переходом к уклонам поверхности и скоростям течений на отдельных горизонтах.

Основы теории установившихся течений разработаны В. Б. Штокманом (1945, 1946, 1953). Им получено для функции полных потоков бигармоническое уравнение с правой частью, пропорциональной вертикальной компоненте вихря тангенциального напряжения ветра. Позднее А. И. Фельзенбаум (1960) предложил численный расчет полных потоков при реальном контуре водоема.

Функция полных потоков (ψ), аналогичная функции тока, вводимой обычно при изучении плоскопараллельного движения несжимаемой жидкости, играет в теории установившихся течений основную роль и может быть описана уравнением Пуассона для неоднородной среды в виде:

$$\Delta\psi - \frac{3}{H} \frac{\partial H}{\partial x} \frac{\partial \psi}{\partial x} - \frac{3}{H} \frac{\partial H}{\partial y} \frac{\partial \psi}{\partial y} = 2k \left(W_x \frac{\partial H}{\partial y} - W_y \frac{\partial H}{\partial x} \right), \quad (1)$$

где $\Delta\psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2}$; H — глубина водоема, м; W_x и W_y — составляющие скорости ветра на координатные оси; k — ветровой коэффициент.

Функция полных потоков $\psi(x, y)$ характеризует интегральную (по вертикали) циркуляцию в водоеме. Физический смысл этой функции может быть получен из следующих соображений. Дифференциальное уравнение линий тока для полных потоков имеет вид:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} dx + \frac{\partial \psi}{\partial y} dy = 0,$$

откуда следует, что семейство кривых $\psi = \text{const}$ есть линии тока для полных потоков.

Объем воды Q , протекающей в единицу времени от поверхности водоема до дна между произвольными вертикалями в точках с координатами (x_1, y_1) и (x_2, y_2) , равен

$$Q = \int_l S_n dl = \int_l \frac{\partial \psi}{\partial l} dl = \psi(x_2, y_2) - \psi(x_1, y_1),$$

где l — произвольная линия, соединяющая точки (x_1, y_1) ; (x_2, y_2) и S_n — нормальная к этой линии составляющая полного потока. Отсюда разность значений функции полных потоков в двух произвольных точках равна объему воды, протекающей в единицу времени между вертикалями, проведенными через эти точки.

Динамические наклоны поверхности водоема, обусловленные воздействием ветра на водную поверхность, выражаются через функцию полных потоков ψ следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \xi}{\partial x} &= -\frac{3T_x}{2g\rho H} - \frac{3A}{g\rho H^3} \frac{\partial \psi}{\partial y}, \\ \frac{\partial \xi}{\partial y} &= -\frac{3T_y}{2g\rho H} + \frac{3A}{g\rho H^3} \frac{\partial \psi}{\partial x}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где A — коэффициент вертикального турбулентного обмена, который для случая мелкого водоема вычисляется по формуле $A = (\gamma/4k)WH$; $g = 9.81$ м/сек. — ускорение силы тяжести; $\rho = 1$ г/см³ — плотность воды; $\gamma = \rho_a \kappa_a = 3.25 \cdot 10^{-3}$ кг/м³ — постоянная величина; $\rho_a = 1.3$ кг/м³ — плотность воздуха; $\kappa_a = 2.5 \cdot 10^{-3}$ — коэффициент трения воздуха о воду; W — скорость ветра, м/сек.; $T_x = \gamma W W_x$, $T_y = \gamma W W_y$ — составляющие тангенциального напряжения ветра на оси координат.

Поскольку динамические наклоны водной поверхности выражаются через функцию полных потоков, то с этой функцией связаны и горизонтальные компоненты скорости течения, которые выражаются через динамические наклоны поверхности водоема:

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{T_x}{A}(H - z) + \frac{g\rho}{A} \frac{H^2 - z^2}{2} \frac{\partial \xi}{\partial x}, \\ v &= \frac{T_y}{A}(H - z) + \frac{g\rho}{A} \frac{H^2 - z^2}{2} \frac{\partial \xi}{\partial y}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где u и v — проекции скорости течения на параллель и меридиан; z — расстояние от поверхности воды до расчетного горизонта, м.

Граничные условия при решении задачи формулируются следующим образом. На поверхности водоема тангенциальное напряжение ветра (T_x и T_y) уравновешивается турбулентным трением в воде, на дне водоема движение отсутствует (при $z = H$, $u = v = w = 0$; w — вертикальная составляющая скорости). Граничные условия на контуре водоема сводятся к тому, что в непосредственной близости от берега отсутствуют расходы

воды в направлении нормали к береговой черте и могут быть записаны в виде:

$$(S_n)_L = 0,$$

где S_n — нормальная к береговой черте L составляющая полного потока.

Однако это условие выполняется только на тех участках контура, где нормаль встречает берег. На жидких же границах, где осуществляется водообмен с соседними участками (например, устье реки), данные условия не выполняются. В этом случае достаточно точное решение воз-

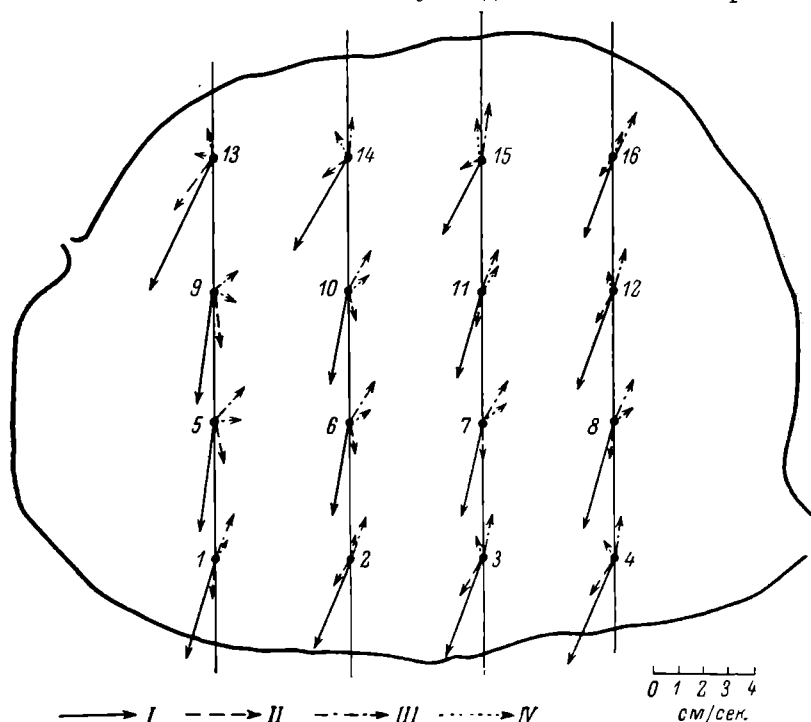


Схема течений Белого озера (скорость ветра 3.3 м/сек., направление — 20°).

Векторы скоростей течения на поверхности (I) и на горизонтах 1 м (II), 2 м (III) и 3 м (IV). Арабские цифры — номера расчетных точек.

можно, если на жидких границах задана нормальная составляющая полного потока. При практических расчетах обычно граничные условия на жидких границах задаются расходами воды.

Таким образом, метод полных потоков при расчете течений во внутренних водоемах позволяет учитывать все три основных фактора (ветер, глубину и влияние приточных вод), формирующих макроциркуляцию вод.

Для расчета течений во внутренних водоемах рассматриваемый метод был использован А. Н. Охлопковой (1965) и В. Х. Лифшицем и Ю. С. Раутайненем (1965). В первом случае объектом для расчета стационарных ветровых течений служило глубоководное Ладожское озеро, где условия формирования течений приближаются к морским, а во втором — одно из небольших мелководных озер Карелии. В обеих работах отмечается удовлетворительная сходимость полученных результатов с натурными наблюдениями. Нами предпринята попытка использования данного метода для расчета ветровых течений в большом мелководном Белом озере, являющемся составной частью Шексинского водохранилища.

При постановке задачи выбор пал на Белое озеро по двум основным причинам. Во-первых, здесь в 1963—1964 гг. лабораторией гидрологии Института биологии внутренних вод АН СССР производились наблюдения над ветровыми течениями самописцами БПВ-2р, привязанными и свободно плавающими поплавками. В результате были получены материалы, позволяющие сопоставить расчетные данные и натурные наблюдения. Во-вторых, правильная форма озера (см. рисунок) и ровный рельеф дна делают его хорошей моделью для проведения различных расчетных экспериментов. Площадь Белого озера при нормальном подпорном уровне Шекснинского водохранилища 1290 км², объем — 5.2 км³, средняя глубина — около 4 м. Как было показано нами ранее (Литвинов, 1969), основные течения в озере — ветровые.

Расчет установившихся ветровых течений был выполнен на ЭВМ «Наири». Решение основного уравнения (1) функции полных потоков производилось методом сеток. Ввиду ограниченного числа ячеек в памяти машины в пределах контура водоема могло располагаться не более 16 точек. Граничные условия с криволинейного контура водоема были перенесены на узлы сетки, близко отстоящие от истинной границы.

Для отыскания численного решения задачи водоем покрывался прямоугольной сеткой с шагом h по оси x и m по оси y . В уравнении (1) производные от каждого внутреннего узла сеточной области заменялись разностными отношениями вида:

$$\begin{aligned}\left(\frac{\partial \psi}{\partial x}\right)_{i,k} &\approx \frac{\psi_{i+1,k} - \psi_{i-1,k}}{2h}, \\ \left(\frac{\partial \psi}{\partial y}\right)_{i,k} &\approx \frac{\psi_{i,k+1} - \psi_{i,k-1}}{2m}, \\ \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}\right)_{i,k} &\approx \frac{\psi_{i+1,k} - 2\psi_{i,k} + \psi_{i-1,k}}{h^2}, \\ \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2}\right)_{i,k} &\approx \frac{\psi_{i,k+1} - 2\psi_{i,k} + \psi_{i,k-1}}{m^2}.\end{aligned}$$

Раскрывая уравнение (1) и заменяя производные по указанной схеме, получим для узла сетки с координатами (x_i, y_k) следующее разностное уравнение:

$$A_{i,k}\psi_{i+1,k} + B_{i,k}\psi_{i-1,k} + C_{i,k}\psi_{i,k+1} + D_{i,k}\psi_{i,k-1} - (2m^2 + 2h^2)\psi_{i,k} = P_{i,k}, \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}A_{i,k} &= m^2 \left[1 - \frac{3(H_{i+1,k} - H_{i-1,k})}{4H_{i,k}} \right]; \\ B_{i,k} &= m^2 \left[1 + \frac{3(H_{i+1,k} - H_{i-1,k})}{4H_{i,k}} \right]; \\ C_{i,k} &= h^2 \left[1 - \frac{3(H_{i,k+1} - H_{i,k-1})}{4H_{i,k}} \right]; \\ D_{i,k} &= h^2 \left[1 + \frac{3(H_{i,k+1} - H_{i,k-1})}{4H_{i,k}} \right];\end{aligned}$$

$$P_{i,k} = k \cdot m \cdot h [W_x \cdot h (H_{i,k+1} - H_{i,k-1}) - W_y \cdot m (H_{i+1,k} - H_{i-1,k})].$$

Число разностных уравнений (4) будет соответствовать числу внутренних узлов сетки, для которых определяется функция полных потоков. Система уравнений (4) является неоднородной линейной системой. Она всегда совместна и имеет единственное решение. Для доказательства этого доста-

точно убедиться в том, что соответствующая однородная система имеет лишь нулевое решение. Действительно, однородная система формально может быть записана в виде системы (4), если положить составляющие скорости ветра W_x и W_y равными нулю при замкнутом водоеме (нулевые граничные условия). При этих условиях однородная система (4) будет всегда совместной, так как она имеет тривиальное решение:

$$\psi_{i,k} \equiv 0.$$

Таким образом, решив неоднородную линейную систему (4), получим приближенное значение функции полных потоков $\psi = \psi(x_i, y_k)$ в узлах сеточной области.

Определив значения функции полных потоков по уравнениям (2) и заменив производные от ψ их разностными соотношениями, можно рассчитать наклоны поверхности водоема. По полученным величинам динамических наклонов из уравнения (3) находятся и горизонтальные составляющие скоростей течения на заданных горизонтах.

Таблица 1

Расчетные данные элементов течения на Белом озере

Номер точки	Горизонт, м											
	поверхность		1-й		2-й		3-й		4-й		5-й	
	v	α	v	α	v	α	v	α	v	α	v	α

Скорость ветра 5 м/сек., направление 225°

1	5.8	55	1.6	83	1.9	196	3.0	210	2.7	216	0.9	216
2	6.7	52	2.3	65	1.1	185	2.3	211	2.4	216	1.0	217
3	7.4	48	3.1	52	0.3	124	1.6	218	2.1	219	1.2	222
4	7.6	47	3.2	51	0.3	108	1.6	218	1.8	221	0.8	220
5	5.3	31	1.6	356	2.1	256	3.3	241	3.2	236	1.9	234
6	5.0	31	1.3	347	2.2	252	3.5	239	3.4	234	2.1	235
7	5.4	32	1.6	356	1.9	258	3.2	236	3.2	233	2.0	233
8	5.9	36	1.9	18	1.3	261	2.7	239	2.9	235	1.8	232
9	6.6	30	2.7	6	1.7	287	2.6	252	2.7	243	1.6	240
10	4.9	32	1.2	351	2.2	249	3.6	238	3.4	234	2.1	231
11	5.0	35	1.1	5	2.0	243	3.3	235	3.4	232	2.1	231
12	6.1	42	2.0	37	0.9	238	2.5	230	2.8	229	1.8	227
13	6.8	41	3.4	36	0.9	230	1.5	249	2.0	225	1.6	220
14	7.3	52	3.1	59	0.7	135	1.8	204	2.2	214	1.1	218
15	6.2	60	2.4	85	1.7	173	2.8	201	2.9	209	1.7	213
16	6.1	54	2.0	72	1.4	183	2.6	211	2.7	216	1.2	215

Скорость ветра 5 м/сек., направление 135°

1	7.4	320	3.4	323	1.3	348	0.9	103	1.3	122	0.5	127
2	7.0	311	3.3	305	0.5	248	1.6	150	1.9	144	0.8	140
3	7.0	308	2.8	297	0.9	201	2.0	153	2.3	146	1.3	141
4	6.8	310	2.3	303	0.8	173	2.2	144	2.3	142	0.9	139
5	6.8	329	2.9	348	1.5	67	2.4	107	2.6	118	1.5	122
6	5.6	327	1.8	354	1.7	100	3.1	119	3.1	123	1.9	126
7	5.1	327	1.3	356	2.0	110	3.3	127	3.3	126	2.0	127
8	5.5	325	1.6	349	1.7	104	3.0	122	3.1	126	1.6	105
9	6.2	320	1.9	330	1.0	107	2.5	127	2.7	129	1.6	130
10	5.3	324	1.4	352	1.8	112	3.0	122	3.2	126	1.9	129
11	5.2	328	1.5	8	2.1	104	3.3	119	3.4	124	2.0	127
12	5.7	330	1.8	3	1.9	96	3.1	117	3.2	122	1.9	125
13	5.9	307	0.8	256	2.6	148	2.8	142	2.8	146	1.6	123
14	6.0	303	2.0	281	1.6	176	2.8	153	2.8	148	1.5	143
15	6.6	307	2.5	293	1.0	191	2.2	157	2.5	146	1.5	143
16	7.1	310	2.9	304	0.5	202	1.9	148	2.1	143	1.1	139

Примечание. Здесь и в табл. 2 v — скорость течения, см/сек.; α — направление, град.

Вычисления скорости и направления течения были произведены для восьми основных румбов направления ветра и четырех значений его скорости (3, 5, 7 и 10 м/сек.). На первом этапе расчетов при отладке программы и проведении контрольного счета контур озера принимался замкнутым (не учитывался приток воды, вносимой р. Ковжей, и отток воды через р. Шексну). Граничные условия в этом случае на контуре водоема принимались равными нулю. В дальнейшем при всех последующих расчетах в граничные условия вводились расходы рек Ковжи и Шексны. Результаты вычислений для преобладающих направлений ветра представлены на рисунке и в табл. 1.

Анализ полученных данных показывает, что поверхностное течение в большинстве случаев отклоняется от направления ветра вправо на угол около 20° . В направлении ветра перемещается верхний 2-метровый слой воды. Ниже этого слоя наблюдается четко выраженное компенсационное течение. Эти данные удовлетворительно согласуются с материалами натурных наблюдений, выполненных не только на Белом озере (табл. 2), но и на других мелководных водоемах, в частности на Рыбинском водохранилище (Литвинов, 1966).

Т а б л и ц а 2

Расчетные и наблюдаемые скорости (см/сек.) и направления течения на Белом озере

Горизонт, м	Расчетные		Наблюдаемые		Расчетные		Наблюдаемые	
	v	α	v	α	v	α	v	α
	Скорость ветра 7 м/сек., направление 180°				Скорость ветра 5 м/сек., направление 225°			
0—1	7.0	13	6.5	30	5.6	35	6.6	30
2—3	2.3	176	2.5	133	2.5	240	2.0	295
	Скорость ветра 5 м/сек., направление 130°				Скорость ветра 3 м/сек., направление 20°			
0—1	5.2	324	5.4	12	3.2	196	3.0	250
2—3	2.5	122	2.2	142	1.5	28	2.5	38

При сравнении результатов расчета без учета притока в озеро и стока из него с данными расчета, учитывающими приток и сток, было отмечено, что последние факторы не оказывают сколько-нибудь существенного влияния на характер установившейся ветровой циркуляции в озере даже при небольших скоростях ветра (порядка 3 м/сек.). Отсюда следует, что основным фактором, обуславливающим движение вод в озере, является ветер. Стоковые течения заметны только в районах, непосредственно прилегающих к устью р. Ковжи и истоку р. Шексны.

Произведенные расчеты элементов течений на Белом озере показали, что метод полных потоков дает вполне удовлетворительные результаты при составлении схем макроциркуляций в больших мелководных водоемах.

ЛИТЕРАТУРА

- Б е р н а д с к и й Н. М. 1933. Теория турбулентного потока и ее приложение к построению течений в открытом водоеме. Матер. по гидрол., гидрогр. и водн. силам СССР, вып. XX.
- К а р а у ш е в А. В. 1960. Сгонно-нагонные явления на водохранилищах и озерах. Л.
- Л и т в и н о в А. С. 1966. Некоторые данные о ветровых течениях в Рыбинском водохранилище. В кн.: Гидрометеорологический режим Верхне-Волжских водохранилищ. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 3, Л.

- Л и т в и н о в А. С. 1969. О ветровых течениях на Белом озере. Информ. бюлл. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, № 4.
- Л и ф ш и ц В. Х., Ю. С. Р а у т и а й н е н. 1965. Пример расчета установившихся течений в озерах с применением метода полных потоков. Вопр. гидрол., озеровед. и водн. хоз. Карелии, вып. XXIII, Петрозаводск.
- О х л о п к о в а А. Н. 1965. Течения Ладожского озера. Автореф. канд. дисс. Л.
- Ф е л ь з е н б а у м А. И. 1960. Теоретические основы и методы расчета установившихся морских течений. М.
- Ш т о к м а н В. Б. 1945. Поперечная неравномерность нагонного ветра как одна из важнейших причин горизонтальной циркуляции в море. ДАН СССР, т. 49, № 2.
- Ш т о к м а н В. Б. 1946. Уравнение поля полных потоков, возбуждаемых ветром в неоднородном море. ДАН СССР, т. 49, № 5.
- Ш т о к м а н В. Б. 1953. Некоторые вопросы динамики морских течений. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 1.
-

НЕКОТОРЫЕ ЧЕРТЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА САРАТОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

В конце 1967 г. в районе г. Балаково закончено строительство Саратовской ГЭС им. Ленинского комсомола и образовалось Саратовское водохранилище. Его нормальный подпорный уровень оказался выше меженного уровня Волги до зарегулирования стока на 13 м. Подпор от плотины Саратовской ГЭС прослеживается до Куйбышевского гидроузла, уровень которого на 3 м выше меженного. Влияние подпора водохранилища распространяется и на притоки Волги: р. Малый Иргиз — на 105 км, р. Чагра — на 80 км, р. Чапаевка — на 50 км, р. Самара — на 63 км, р. Сок на 32 км от устья (Елфимов, 1968).

По материалам Гидропроекта, водный баланс водохранилища складывается из следующих составляющих: среднемноголетний приток — 242.9 км³, потери на испарение — 1.1 км³, сброс в нижний бьеф — 241.8 км³, в том числе через турбины — 200.9 км³, холостые сбросы — 38.5 км³, сбросы через шлюзы, фильтрация — 2.4 км³, коэффициент водообмена — 18.9.

Основная масса воды (до 99%) поступает из Куйбышевского водохранилища. Роль притоков (табл. 1) в общем водном балансе Саратовского водохранилища незначительна, но специфичность водных масс, формирующихся в них, оказывает существенное влияние на распространение водных организмов, обитающих в этих районах.

Таблица 1

Характеристика основных притоков Саратовского водохранилища

Приток	Длина, км	Площадь водо- сбора, км ²	Средний сток, м ³ /сек.	Расход воды по сезонам, м ³ /сек.			
				максимальный		минимальный	
				осень	зима	весна	лето
Сок	345	11280	16.5	9.50 5.67	47.0 4.35	418 6.9	12.9 5.56
Самара	587	46484	51.9	21.0 10.7	139 8.34	1120 16.9	40.8 11.9
Чапаевка	332	4210	2.61	0.49 0.11	29.7 0.06	193 0.17	1.17 0.06
Сызранка	152	5550	0.83	1.08 0.13	17.9 0.07	44.5 0.25	3.60 0.11
Чагра	243	3510	3.53	1.28 0.42	38.2 0.36	164 0.79	1.30 0.40
Малый Иргиз . .	194	3850	3.21	—	—	—	—

В задачу нашего исследования входило изучение изменений гидрологических характеристик Волги на участке Тольятти—Балаково после строительства Куйбышевского, а затем Саратовского гидроузлов. Сбор материалов осуществлялся в экспедиционных условиях в течение 1965—1970 гг. Работы проводились с судна «Наука» при отсутствии льда, а зимой — на автомашине ГАЗ-63. Измерялись температура и электропроводность воды, скорость течения, концентрация хлор-ионов, прозрачность, цветность, жесткость, содержание кислорода и углекислоты, pH. Анализ полученных данных позволил определить некоторые характерные черты гидрологического режима Саратовского водохранилища.

Прежде чем перейти к их описанию, отметим, что бытовой режим Волги на участке Тольятти—Балаково претерпел изменение дважды: после строительства Куйбышевского гидроузла и после создания Саратовского водохранилища.

На первом этапе изменения гидрологических условий Волги заключались в следующем. В результате зарегулирования стока Волги Куйбышевской ГЭС произошло изменение в уровненом режиме, прежде всего в величине и интенсивности колебаний его во времени, в положении уровня относительно берегового склона. Паводочный сток на участке нижнего бьефа Куйбышевской ГЭС проходит, как правило, позднее, чем в бытовых условиях. Вследствие срезки пика паводков произошло сокращение площади заливных лугов, так как часть из них не затопливается из-за ограничения расходов, а другие затопливаются в сроки, неприемлемые для вегетации растений. Ухудшились условия нереста рыб в связи с осушением нерестовых площадей (полоев) и с резкими паводочными колебаниями уровня. Изменился скоростной режим нижнего бьефа в результате неравномерности нагрузки Куйбышевской ГЭС в суточном и недельном аспектах. Изменение стока по сезонам привело к значительному увеличению расходов в зимний период. В результате попусков относительно теплой воды из Куйбышевского водохранилища зимой в нижнем бьефе образовалась полынья, достигающая пос. Моркваши, что привело к изменению температурного режима на данном участке.

При изучении изменений температурного режима на участке Тольятти—Саратов после строительства Куйбышевской ГЭС была отмечена следующая особенность. За счет перемешивания водных масс агрегатами Куйбышевской ГЭС среднедекадная температура воды в нижнем бьефе Куйбышевской ГЭС оказалась ниже, чем была в бытовых условиях, в первой половине лета, и выше, чем во второй (Ляхов, 1963).

Значительные изменения скоростного режима произошли только на участке Тольятти—Куйбышев. Ввиду неравномерности нагрузки на ГЭС изменился характер течений. Так, в районе пос. Моркваши наблюдаются обратные вдольбереговые течения у о. Телячьего и пристани Моркваши. Скорости обратных течений достигают 20—40 см/сек.

Физико-химические характеристики воды в основном остались без изменений, за исключением прозрачности воды, которая на участке Тольятти—Куйбышев несколько увеличилась.

В гидрологическом режиме притоков на участке Тольятти—Балаково после строительства Куйбышевской ГЭС существенных изменений не обнаружено. Исключение составила р. Сок, где при максимальной нагрузке на ГЭС наблюдались обратные течения. При этом проникновение волжской воды в р. Сок не превышало 1—2 км от устья. Во время весеннего паводка волжские воды заполняли приустьевую пойму р. Сок, понижая электропроводность воды этой реки с 450 до 200—230 мксим/см и повышая прозрачность с 45—50 до 70—80 см. После прохождения весеннего половодья на Волге в р. Сок восстанавливался бытовой режим.

Наполнение Саратовского водохранилища вызвало новые существенные изменения в гидрологическом режиме Волги на участке Тольятти—Балаково. Прежде всего они касаются уровня режима. Наиболее значительные колебания уровня происходят на участке Тольятти—Куйбышев (рис. 1). Амплитуда колебаний в районе пос. Моркваши достигает 2 м и полностью определяется режимом работы Куйбышевской ГЭС.

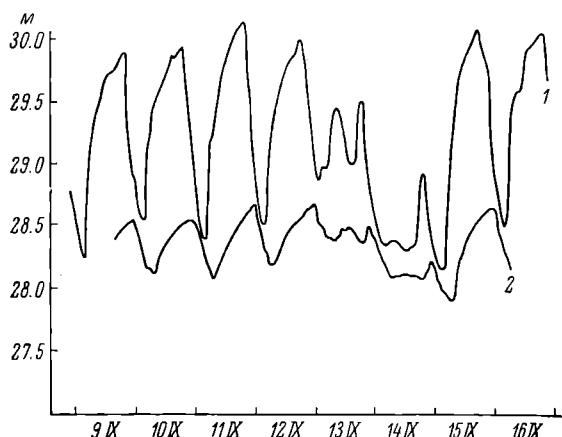


Рис. 1. Колебания уровня воды в Саратовском водохранилище в сентябре 1968 г.

1 — пос. Моркваши; 2 — г. Куйбышев.

Через 1.5—2 часа волна попуска достигает г. Куйбышева. Следовательно скорость распространения волн попуска на данном участке равна 36—47 км/час (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Амплитуда волн попусков Куйбышевской ГЭС им. В. И. Ленина

Местоположение станции	Расстояние от ГЭС, км	Регулирование		Скорость распространения, км/час
		недельное	суточное	
ГЭС	0	148	92	—
Зольное	20	156	115	—
Куйбышев	70	70	50	36—47
Переволоки . . .	140	25	18	26—32

Представление о распределении скоростей течения на участке Тольятти—Балаково до и после строительства Саратовской ГЭС дает рис. 2. До сооружения Саратовской ГЭС скорости течения постепенно уменьшались от плотины Куйбышевской ГЭС вниз по течению. Некоторое увеличение их в районе г. Балаково объясняется уменьшением поперечного сечения Волги. После строительства гидроузла у г. Балаково и образования Саратовского водохранилища отмечается общая картина распределения скоростей течения, характерная для всех водохранилищ каскада.¹

О распределении скоростей течения по поперечному сечению водоема говорить затруднительно, так как течение на пойменных станциях водо-

¹ От плотины Саратовского гидроузла к зоне выклинивания подпора скорости течения систематически увеличиваются (рис. 2).

хранилища инструментально наблюдалось в редких случаях. Все же можно отметить, что скорости течения на правобережной пойме несколько больше, чем на левобережной.

С образованием Саратовского водохранилища на его притоках наблюдаются обратные течения. На реках Сок, Самаре, Чапаевке они возникают под влиянием попусков Куйбышевской ГЭС, а на р. Малый Иргиз — под влиянием неравномерности нагрузки агрегатов Саратовской ГЭС. Особенно четко обратные течения наблюдаются на р. Самаре.

Некоторые особенности температурного режима Саратовского водохранилища заключаются в следующем. С одной стороны, для него характерны более ранние сроки замерзания и более поздние сроки вскрытия

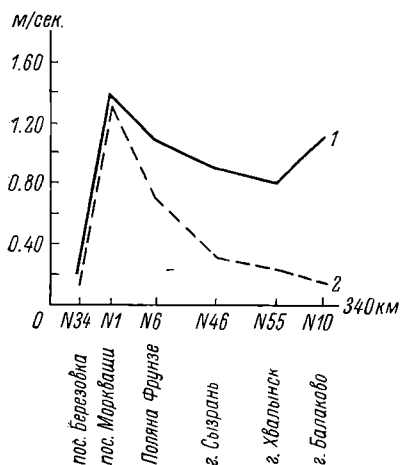


Рис. 2. Скорости течения в Саратовском водохранилище после строительства Куйбышевского (1) и Саратовского (2) гидроузлов.

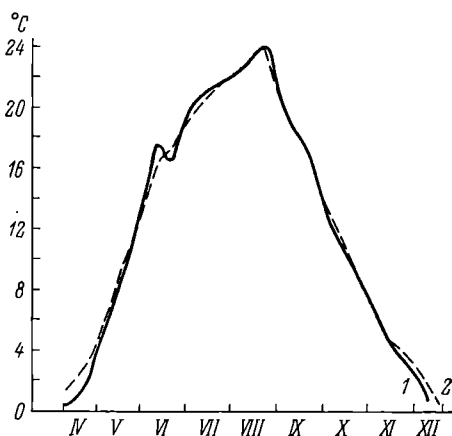


Рис. 3. Ход температуры воды в Саратовском водохранилище в районе г. Комсомольска (1) и г. Куйбышева (2).

ото льда. Но, с другой стороны, если сравнивать температурный режим Приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища и район г. Куйбышев—Саратовское водохранилище (рис. 3), то можно отметить следующее: замерзание Саратовского водохранилища происходит на 7—10 дней позже, а вскрытие — на 8—11 дней раньше, чем Куйбышевского. По всей вероятности, причина этого заключается в мощных течениях и в относительно теплой воде на участке Тольятти—Куйбышев. Скорости течения в Приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища в 7—10 раз ниже, чем на указанном выше участке Саратовского водохранилища. Кроме того, интенсивное перемешивание вод агрегатами Куйбышевского гидроузла повышает несколько температуру воды на сопряженном участке Саратовского водохранилища.

В годовом цикле термический режим Саратовского водохранилища можно разделить на 4 периода: зимняя гомотермия, весенний прогрев, летнее прогревание и осеннее выхолаживание.

Температурный режим в начале ледостава определяется гидрометеорологическими факторами в предледоставный период. Наступление ледостава на Саратовском водохранилище происходит в третьей декаде ноября—начале декабря.

При слабой штормовой деятельности и резком понижении температуры воздуха в период ледообразования водные массы, оказавшиеся подо льдом, имеют температуру порядка $0.5-0.7^{\circ}$. В год с интенсивной штормовой деятельностью в осенний период водные массы сильно выхолаживаются и температура на глубине не превышает 0.1° .

Температура воды Саратовского водохранилища в зимний период однородна. Наблюдения, проведенные в январе 1969 г. на разрезах у Сызрани и Балаково, показали, что вода находится в состоянии гомотермии при температуре около нуля. Обратная стратификация температуры по глубине отмечалась у Балаково в январе 1970 г. при замедленном водообмене на левобережной пойме, средней температуре по вертикали 0.1° и разности между температурой на поверхности и у дна $0.2-0.3^{\circ}$. Повторные наблюдения в марте 1970 г. в этом районе обнаружили наличие гомотермии. Можно считать, что охлаждение водных масс продолжается всю зиму и минимум температуры вод по вертикали наступает непосредственно перед вскрытием водохранилища.

В период ледохода температура воды в поверхностном слое постепенно повышается. Существенную роль при этом играет не только общее повышение температуры воздуха, но и значительный приток более теплых вод малых рек. После очищения водохранилища начинается интенсивный прогрев воды. В устьях притоков уже через 2—4 дня после освобождения ото льда температура поверхностных вод достигает $3-4^{\circ}$. Значительно медленнее идет прогрев русловой части, так как воды, поступающие из Куйбышевского водохранилища, значительно холоднее теплых талых вод поймы и притоков. Таким образом, в весенний период наблюдается термическая неоднородность по ширине водохранилища. В начале июня происходит выравнивание температуры как по ширине, так и по длине водоема.

В летний период в русловой части водохранилища наблюдается в основном гомотермия, обусловленная поступлением вод из Куйбышевского водохранилища, которые хорошо перемешиваются агрегатами гидроузла. Кроме того, в верховьях водохранилища наблюдаются значительные скорости течений — $0.40-0.70$ м/сек., способствующие интенсивному перемешиванию. На пойменных участках водохранилища отмечается прямая температурная стратификация. Градиент температуры при средних глубинах 2—4 м достигает 0.6° .

В конце августа—начале сентября начинается охлаждение водных масс. Выхолаживание происходит плавно и захватывает всю толщу воды. В конце сентября—начале октября наблюдается гомотермия, в конце октября — гетеротермия. Температура воды в пойменной зоне водохранилища на $1.5-2^{\circ}$ ниже, чем в русловой части. Четко отмечается термическая неоднородность и по длине водохранилища. Так, в октябре 1970 г. в верховье водохранилища температура воды была 11.8° , в районе г. Балаково — 10.0° , а на пойме в районе рек Чагры и Малого Иргиза соответственно 8.2 и 9.6° .

Продолжительность каждого периода, по нашим определениям, составляет:

Зимняя гомотермия	140 дней
Весенний прогрев	10—12 »
Летнее прогревание	110 »
Осеннее выхолаживание	100 »

Учитывая особенности уровня режима, распределения скоростей течения и температуры, Саратовское водохранилище по гидрологическому режиму, с нашей точки зрения, можно разделить на 2 участка: озерно-речной и озерный. Первый находится под влиянием попусков через Куйбышевский гидроузел, второй включает в себя как бы переходный участок и зону непосредственного влияния Саратовской ГЭС. Исходя из этого, с учетом морфометрии нами предлагается следующее районирование водохранилища (табл. 3).

К у и б ы ш е в с к и й п л е с — от плотины Волжской ГЭС им. В. И. Ленина до г. Октября. Резкое падение скоростей течения по

Морфометрические характеристики Саратовского водохранилища

Плес	Границы плесов	Длина, км	Ширина, км		Глубина, м		Пло- щадь, км ²	Объем, км ³
			ср.	макс.	ср.	макс.		
Куйбышевский	Волжская ГЭС им. В. И. Ле- нина — г. Ок- тябрьск . . .	180	7	3	21	5	905	4.5
Сызранский	Г. Октябрьск — пос. Аграфе- новка	69	13	6	26	8	341	2.7
Хвалынский	Пос. Аграфено- вка — пос. Ме- ровка	66	20	6	29	8	530	4.2
Приплотинный (Балаковский)	Пос. Меровка — г. Балаково	25	6	5	33	9	174	1.6
Водохранилище	—	340	20	5.5	33	7	1950	13.0

длине плеса. На весь плес распространяется действие волн попуска Куйбышевского гидроузла, оказывающее существенное влияние на уровень и скоростной режимы плеса и притоков. По всему плесу — однородные температурные условия (гомотермия), исключение составляют устьевые участки малых рек. Распределение кислорода, углекислоты, рН, концентрации хлор-ионов однородно по всему плесу и зависит только от сезона года.

Сызранский плес — от г. Октябрьска до пос. Аграфеновка. Незначительное колебание абсолютных значений скоростей течения. Уровень режим более стабилен, так как действие волн попусков ослаблено. Наблюдаются термическая неоднородность по ширине и глубине плеса и различия в физико-химических свойствах вод по вертикали.

Хвалынский плес — от пос. Аграфеновка до пос. Меровка. Скоростной режим плеса находится под воздействием неравномерности нагрузки Саратовской ГЭС. Особенно четко прослеживается изменение направления течения в притоках Чагра и Малый Иргиз. Основная масса воды однородна по химическому составу, исключая воды рек Чагры и Малого Иргиза, где наблюдаются повышенные электропроводность и концентрация хлоридных ионов.

Приплотинный (Балаковский) плес — от пос. Меровка до плотины Саратовской ГЭС. Наиболее глубоководный плес. На его акватории происходит полное смешение вод притоков. Образуется однородная водная масса Саратовского водохранилища, характерная для верховьев Волгоградского водохранилища. Электропроводность и содержание хлор-ионов однородны по ширине и длине плеса. Наблюдается температурная стратификация. Скоростной режим плеса полностью зависит от неравномерности нагрузки Саратовского гидроузла, что оказывает влияние как на абсолютные значения скоростей течения, так и на их направление.

ЛИТЕРАТУРА

- Е л ф и м о в А. В. 1968. Саратовское водохранилище. Сб. работ Куйбышевской гидрометеорол. обсерв., вып. 5, Л.
Л я х о в С. М. 1963. Об изменении температурного режима Волги на участке от Волжской ГЭС им. В. И. Ленина до Саратова. В кн.: Материалы по биологии и гидрологии волжских водохранилищ. М.—Л.

БАЛАНС ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В РЫБИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Баланс взвешенных веществ в водохранилищах составляется обычно с целью оценки заиления водоемов и направленности данного процесса во времени. Помимо этого исследование отдельных статей баланса позволяет охарактеризовать количественно трансформацию твердого стока реки и осветить некоторые аспекты проблемы «чистой воды», в частности изменение режима мутности в условиях зарегулированного стока. Необходимость исследования таких изменений настоятельно подчеркивается в гидрологической литературе (Караушев, 1963; Лисицина, 1968). Наличие основы в виде общего баланса взвешенных веществ даст возможность рассчитать поступление в водоем взвешенных аллохтонных органических веществ и оценить их роль в продукционном процессе.

Мы предприняли попытку составить баланс взвешенных веществ в Рыбинском водохранилище за 25 лет его существования (1941—1965 гг.). Он позволяет оценить поступление в водоем различных алло- и автохтонных взвесей в период наиболее интенсивного осадконакопления и становления его биологической структуры.

Основная трудность, с которой мы столкнулись, заключалась в малочисленности фактического материала. Поэтому в ряде случаев при расчетах пришлось прибегнуть к аналогиям и допущениям. Составленный таким образом баланс взвешенных веществ следует рассматривать как ориентировочный. Однако, несмотря на это, он достаточно ясно раскрывает роль алло- и автохтонных факторов в формировании дна водоема и некоторых условий существования водных организмов в указанный период, который иногда называют периодом «созревания» водохранилища.

Проведенные с 1955 по 1968 г. исследования грунтового комплекса и водных взвесей Рыбинского водохранилища показали, что источниками поступления взвешенных веществ в водоем являются: 1) сток взвешенных наносов рек; 2) продукция планктона; 3) размыв торфяных сплавин; 4) размыв берегов и дна; 5) продукция высшей водной растительности; 6) физико-химические процессы, происходящие в водоеме. Два последних фактора не имеют существенного значения в образовании взвесей. Высшая водная растительность представлена в водохранилище отдельными пятнами, площадь зарослей составляет всего 1.3% от площади водоема. Продукция высшей водной растительности в десятки раз меньше продукции фитопланктона (Белавская и Кутова, 1966). При понижении уровня в навигационный период часть продукции высшей водной растительности разлагается на побережье, а у растительности, оставшейся в воде и перезимовавшей, подвергается распаду от 40 до 100% массы (Корелякова,

1958). Из физико-химических процессов, приводящих к образованию взвесей, некоторое значение может иметь процесс вымывания из грунта закисных солей железа с последующим окислением их и выпадением из раствора в форме гидратов окиси железа. В отличие от озер, где появление гидратов железа в воде приурочено к периодам весенней и осенней циркуляции, в водохранилище гидраты железа присутствуют во взвешях в течение всего года и содержание их уменьшается от речных плесов к Главному (Зиминова, 1965). Это дает основание полагать, что минеральные формы железа приносятся в основном с речным стоком, а физико-химический процесс образования их в водохранилище имеет подчиненное значение. Карбонатообразование также почти исключается в силу недонасыщенности воды водохранилища карбонатом кальция.

Учитывая приведенные соображения, мы включили в приходную часть баланса четыре основные статьи: сток взвешенных наносов рек, продукцию планктона, размыв торфяных сплавин и размыв берегов и ложа.

Расходную часть баланса составляют сброс взвесей через Рыбинский гидроузел и накопление донных отложений. Содержание взвесей в водной массе водохранилища в конце расчетного периода не было включено в баланс, поскольку, как показывает расчет, оно незначительно (около 40 тыс. т) в сравнении с другими статьями баланса.

Таким образом, составленное нами уравнение баланса взвешенных веществ в Рыбинском водохранилище имеет вид:

$$Н + П + Сп + БД = О + Сб,$$

где Н — сток взвешенных наносов рек; П — продукция планктона; Сп — размыв торфяных сплавин; БД — размыв берегов и дна; О — накопление донных отложений; Сб — сброс взвесей через гидроузел.

Как в приходной, так и в расходной части баланса можно выделить элементы, величина которых в многолетнем разрезе колеблется около некоторого среднего значения в зависимости от режимных и климатических особенностей года. К таким элементам относятся сток взвешенных наносов рек, сброс взвесей через гидроузел и продукция планктона. При определении этих элементов за 25 лет существования водохранилища мы исходили из их среднемноголетней величины.

Для годовых величин остальных элементов баланса характерна тенденция к постепенному уменьшению. Мы не располагаем данными об изменении интенсивности этих процессов во времени. Поэтому при составлении баланса определялась результирующая величина соответствующих элементов баланса за весь исследуемый период.

Имеющиеся материалы позволили вычислить величины всех статей баланса, за исключением размыва берегов и дна. Поступление взвешенных веществ из этого источника было определено из приведенного уравнения баланса. Рассмотрим каждый член этого уравнения отдельно.

Сток взвешенных наносов рек. Подсчет стока взвешенных наносов притоков производился по той же схеме, что и подсчет стока воды при составлении водного баланса водохранилища (Рутковский и Курдина, 1959). По трем основным притокам — Волге, Мологе и Шексне — сток наносов рассчитывался соответственно для створов: Угличская ГЭС, Лентьево и Черная Гряда, являющихся верхними границами речных плесов водохранилища. Остальная часть бассейна по характеру четвертичных отложений и величине модуля стока делится В. И. Рутковским и Т. Н. Курдиной (1959) на три района. Первый включает водосборы рек между Волгой у Рыбинской плотины и Мологой. Здесь распространены преимущественно покровные суглинки и супеси и хорошо развита речная сеть. Во втором районе, включающем пространство между р. Мо-

логий и западным водоразделом р. Ягорбы, значительная площадь занята торфяниками и песками озерного происхождения. Третий район занимает пространство между западным водоразделом р. Ягорбы и р. Волгой у Рыбинской плотины. Четвертичные отложения здесь те же, что и в первом районе, но с заметным преобладанием суглинков. Этот район отличается также большой увлажненностью и, как следствие, большими модулями стока. Ландшафтные различия выделенных районов в пределах Ярославской области отмечены В. К. Дегтеревским (1958). Таким образом, можно считать, что приведенное деление водосбора на районы учитывает основные факторы водной эрозии и может быть принято при расчетах стока взвешенных наносов.

Расчет среднегогодового стока взвешенных наносов для выделенных водосборов производился методом кривой обеспеченности, построенной по теоретическим точкам (Лебедев, 1955). Методика расчетов стока взвешенных наносов рассматривается детально в работе Н. А. Зиминовой и В. П. Курдина (1970). Здесь же мы ограничимся приведением полученных результатов и характеристикой некоторых особенностей распределения стока наносов в пределах водосбора.

Т а б л и ц а 1

Сток взвешенных наносов
притоков Рыбинского водохранилища (тыс. т)

Река	Среднегого- летний	За период 1941—1965 гг.
Волга	219	5470
Молога	43	1080
Шексна	201 *	5030
Реки первого района . . .	41	1020
Реки второго района . . .	49	1220
Реки третьего района . . .	207	5180
Всего	760	19000

* Среднегогодовой сток Шексны до создания Шексинского водохранилища (1941—1962 гг.) равнялся 227 тыс. т, после его создания (1963—1965 гг.) — 14 тыс. т.

Первое место по величине стока взвешенных наносов занимала Шексна (табл. 1), несмотря на то что условия для развития водной эрозии в ее бассейне менее благоприятны, чем в других частях бассейна водохранилища (большая заболоченность, преобладание в четвертичных отложениях валунных суглинков и глин, а в почвенном покрове — подзолистых почв глинистых и суглинистых разностей). Причина такого несоответствия заключается в наличии в истоке Шексны мелководного Белого озера, глинистые илы которого, занимающие большую часть его профундали, при взмучивании значительно обогащают воду взвесями. Эта особенность питания Шексны обусловила внутригодовое распределение стока взвешенных наносов, которое в отличие от большинства равнинных рек характеризуется повышенными величинами в течение всей летне-осенней межени.

Создание Шексинского водохранилища привело к резкому уменьшению транспортирующей способности потока в верхнем бьефе Шексинской ГЭС и, как следствие, к уменьшению стока взвешенных наносов, поступающих в Рыбинское водохранилище, примерно на 200 тыс. т. Это обстоятельство следует иметь в виду при расчетах поступления взвешенных веществ в водохранилище в настоящее время.

На втором месте по величине стока взвешенных наносов стоит Волга,¹ на третьем — реки третьего района, который характеризуется большими по сравнению с другими частями бассейна модулями стока, что в сочетании с холмисто-волнистым рельефом обеспечивает большую величину среднегодовой мутности.

Общий сток взвешенных наносов в водохранилище равен 19 000 тыс. т, а среднегодовой — 760 тыс. т (табл. 1).

Продукция планктона. Среди планктонных организмов, населяющих водоем, основным поставщиком взвешенного автохтонного вещества является фитопланктон. Величины продукции фитопланктона за вегетационный период, определенные для отдельных лет различными авторами, представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Продукция фитопланктона в Рыбинском водохранилище
за вегетационный период

Год	Под 1 м ² , г сухого органического вещества		Литературный источник
	чистая	валовая	
1955	100	154	Сорокин (1958)
1958	—	198	Пырина (1966)
1959	216	332	Романенко (1966)
1961	64	98	Кузнецов и Карпова (1966)
1964	58	89	Кузнецов и др. (1966)
1965	36	55	Кузнецов и др. (1967)
1966	148	228	} Кузнецов и др. (1970)
1967	132	204	
Средняя ...	—	170	

Приведенные величины первичной продукции все авторы, за исключением И. Л. Пыриной (1966), определяли радиоуглеродным методом. В. И. Романенко (1967) на массовом материале установил, что радиоуглеродный метод дает величину, близкую к чистой продукции, и в 1.54 раза меньше валовой. Поэтому при расчете среднегодовой продукции значения, полученные радиоуглеродным методом, были умножены на 1.54. Как следует из табл. 2, колебания первичной продукции от года к году довольно значительны и обусловлены гидрометеорологическими особенностями отдельных лет (характер и сроки наполнения водохранилища, химизм приносимых вод и насыщенность их планктоном, ход температуры воды). Средняя за вегетационный период продукция из данных за 8 лет равна 170 г сухого органического вещества под 1 м². В пересчете на среднюю за вегетационный период площадь водохранилища это дает 665 тыс. т сухого органического вещества. Указанную величину можно принять за среднегодовую, поскольку фотосинтез подо льдом ничтожно мал в сравнении с фотосинтезом в период вегетации.

По исследованиям Б. А. Скопинцева (1947) и С. И. Кузнецова (1955), 80—90% продукции фитопланктона относится к нестойкому органическому веществу, минерализующемуся в течение нескольких дней. Исходя из этого, от общей продукции фитопланктона в водохранилище остается

¹ Среднегодовой сток наносов в створе Угличского гидроузла несколько больше приводимого ранее (Зиминова, Курдин, 1970), так как при данном расчете использовались полученные дополнительно результаты наблюдений над стоком наносов.

во взвешенном состоянии около 100 тыс. т, что за 25 лет дает величину 2500 тыс. т сухого органического вещества.

На основе деструктируемого органического вещества в водоеме развивается бактериопланктон. Продукция бактерий в Рыбинском водохранилище вполне соизмерима с продукцией фитопланктона (Романенко, 1966; Кузнецов и др., 1967). Однако, учитывая судьбу большей части бактериальной биомассы (лизис, выедание зоопланктоном, деструкция), мы не включили ее в баланс взвесей, принимая с некоторыми допущениями, что ее приход равен расходу.

Нами была предпринята попытка оценить величину продукции зоопланктона, пользуясь уравнением Г. Г. Винберга (Винберг и др., 1965):

$$П = P_0 - P_e + P_e,$$

где P — общая продукция зоопланктона; P_0 — продукция нехищного зоопланктона; P_e — продукция хищного планктона; P_e — рацион хищников.

При расчетах были приняты средние за вегетационный период величины биомассы руководящих форм, приведенные в работе Л. А. Луфевой и А. В. Монакова (1966), коэффициенты P/B (отношение продукции к биомассе) для соответствующих форм в мезотрофном озере по Г. Г. Винбергу (Винберг и др., 1965) и рационы хищников по Э. А. Шушкиной и Г. А. Печень (1964). Расчет дал величину продукции зоопланктона, равную 16 тыс. т сухого веса, т. е. она значительно ниже продукции фитопланктона и находится в пределах точности ее определения. Поэтому при составлении баланса продукция зоопланктона не учитывалась.

Размыв торфяных славин. Водами Рыбинского водохранилища было затоплено около 800 км² торфяных болот. Часть торфяных массивов со временем всплыла на поверхность воды, образовав торфяные острова — славин, подверженные действию волнения и являющиеся источником мелкой торфяной взвеси. Последовательность всплывания торфяных славин на водохранилище описана С. Н. Тачаловым (1965). По его данным, в первые годы существования водохранилища происходило всплывание небольших островов, вызываемое поднимающимся при весеннем наполнении льдом, смерзшимся с торфом. Часть торфов при оттаивании тонула, и суммарная площадь сохранявшихся на поверхности славин на протяжении первых пяти лет изменялась мало. После наполнения водохранилища до проектной отметки 1947 г. всплывание торфов активизировалось и достигло максимума в 1958—1960 гг.

Параллельно с процессом всплывания шел процесс разрушения славин под воздействием ветрового волнения. Интенсивность этого процесса со временем нарастала по мере самоочищения водохранилища от затопленной наземной растительности и увеличения вследствие этого размеров ветрового волнения. К началу 60-х годов часть доступных волнению славин была полностью разрушена, площадь других значительно уменьшилась. К 1965 г. разрушению подверглось около 40% площади всех славин, всплывших на водохранилище за период 1941—1965 гг. Общий объем разрушенных славин составил по ориентировочным расчетам $660 \cdot 10^5$ м³. Абсолютно сухой объемный вес торфа в Рыбинском водохранилище, по нашим определениям, равен 0.08 г/см³. Исходя из этого, общий абсолютно сухой вес взвешенных веществ, поступивших к 1965 г. в водохранилище за счет размыва торфяных славин, составил 5280 тыс. т. По данным С. Н. Тачалова (1965), начиная с 1961 г. всплывание торфов пошло на убыль и с каждым годом оно уменьшается. Поскольку всплывшие и доступные волнению славин в значительной степени разрушены, то поступление материала из этого источника неуклонно сокращается и в будущем его можно будет исключить из баланса взвешенных веществ.

Накопление донных отложений. Для определения объема донных отложений, накопившихся в водохранилище за исследуемый период, весь водоем был разбит на участки, в пределах которых однородны морфометрия и гидрологический режим, а следовательно и условия седиментации взвесей. Детальная характеристика особенностей осадконакопления на различных участках приведена ранее (Зиминова и Курдин, 1968б). Для каждого участка определялась средняя высота слоя отложений в определенных интервалах глубин. Объем материала, отложившегося в каждом интервале, вычислялся как произведение средней высоты слоя отложений на площадь, занимаемую данными глубинами. Затем суммированием находился общий объем заиления данного участка. Объем заиления водохранилища, подсчитанный таким образом, был равен к 1965 г. 0.283 км³. Распределение этой величины по плесам и типам грунта приводится в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Заиление Рыбинского водохранилища

Плес и тип грунта	Объем отложения, км ³	Объемный вес, г/см ³	Вес отложений, тыс. т
Волжский:			
песчанистый серый ил	0.01502	0.34	5110
серый ил	0.01718	0.29	4980
переходный ил	0.00514	0.15	770
Моложский:			
пылеватый песок	0.00110	1.53	1680
илистый песок	0.00145	1.01	1460
песчанистый серый ил	0.00260	0.34	880
серый ил	0.00059	0.29	170
Шекснинский:			
илистый песок	0.00279	1.01	2820
песчанистый серый ил	0.00427	0.34	1450
серый ил	0.01587	0.29	4600
переходный ил	0.00107	0.15	160
Главный:			
пылеватый песок	0.02509	1.53	38400
илистый песок	0.00333	1.01	3360
песчанистый серый ил	0.01262	0.34	4290
серый ил	0.04862	0.29	14100
переходный ил	0.06446	0.15	9670
торфянистый ил	0.06195	0.15	9290
Всего	0.283	—	103200

Необходимо отметить одно обстоятельство, связанное с вопросами заиления водоемов. Часто под заилением понимается простое уменьшение объема чаши водохранилища, которое может быть определено на основе батиметрических исследований. При этом считается, что если уменьшение объема в одной части водоема произошло за счет увеличения его в другой (например, размыв дна, всплывание торфяных славин), то в целом объем водохранилища существенно не изменился и можно говорить об отсутствии или об очень небольшом размере заиления. Такой подход дает представление о суммарном изменении объема чаши водоема под воздействием ряда факторов, но не отражает существа процесса заиления, состоящего в накоплении вторичных отложений в водоеме и формировании качественно нового дна, обладающего иными морфологическими и физико-химическими свойствами, независимо от того, что грунтообразующее вещество имеет автохтонный характер. Это явление не может не оказывать влияния на биологические процессы, происходящие в водоеме. Так, образование

на затопленных почвах вторичных песчаных отложений повлечет за собой изменения в продуктивности донной фауны, а следовательно и в условиях нагула рыб-бентофагов. Таким образом, накопление даже сравнительно небольшого объема вторичных отложений может вызвать существенную перестройку условий существования водных организмов, хотя результирующего изменения объема водохранилища в целом может при этом и не произойти.

Для перехода от объемного выражения заиления водохранилища к весовому необходимо знать объемный вес донных отложений. Существующие в литературе данные по объемному весу донных отложений различных водохранилищ относятся главным образом к отложениям со сравнительно низким содержанием органического вещества. В Рыбинском водохранилище у преобладающих типов вторичных грунтов потеря в весе при прокаливании составляет 10—70 % (Курдин, 1960). Это обстоятельство заставило нас произвести непосредственные определения объемного веса грунтов рассматриваемого водоема (Зиминова и Курдин, 1969). Пересчет объема отложений в вес приводится в табл. 3. Общий вес вторичных отложений водохранилища к 1965 г. был равен 103 200 тыс. т сухого вещества.

Сброс взвесей через Рыбинский гидроузел. По вопросу о величине стока взвешенных веществ из водохранилища существует мнение, что он во много раз превышает сток наносов его притоков. Отсюда следует, что отстойный эффект водохранилища равен нулю, а накопление донных отложений должно быть ничтожно.

Для уточнения этого нами в 1967 г. были проведены систематические наблюдения над стоком взвешенных наносов в водоводах Рыбинской ГЭС. Было установлено, что сезонная динамика мутности в створе ГЭС характеризуется наименьшими величинами в период ледостава, резким возрастанием во время интенсивного наполнения и максимальными значениями в период, свободный от льда. Такой годовой ход мутности в сочетании с характером регулирования стока обуславливает существенное внутригодовое перераспределение стока взвешенных веществ в створе плотины по сравнению с естественными условиями. Наименьшее количество сбрасываемого

через гидроузел взвешенного вещества приходится на апрель, максимальное — на октябрь.

Анализ годового хода мутности в створе плотины показывает, что среднегодовая величина определяется не только мутностью вод, поступающих в водохранилище, т. е. интенсивностью эрозионных процессов на водосборе, но в значительной степени процессами, происходящими в самом водоеме.

Наши исследования динамики и распределения мутности по водохранилищу за ряд лет показали, что в период ледостава ее величина и колебания от года к году минимальны (Зиминова, 1963). Средняя мутность вод, сбрасываемых из водохранилища в период его интенсивного наполнения, колеблется в зависимости от соотношения объемов вод различного генезиса в приплотинном участке. Наблюдения весной 1961 и 1967 гг. свидетельствуют, что пределы этих колебаний от года к году меняются незначительно. Средняя мутность сбрасываемых вод весной 1967 г. была равна мутности вод весеннего периода 1961 г., близкого по условиям весеннего водообмена к среднемноголетнему. Наибольшим колебаниям в створе гидроузла подвержена мутность в безледоставный период. Учитывая, что величины ее в это время имеют максимальные значения,

Месяц	Сток (тыс. т)
I	10.2
II	10.7
III	4.3
IV	0.9
V	9.5
VI	14.2
VII	18.5
VIII	11.8
IX	17.9
X	30.7
XI	20.5
XII	16.6
За год	166

а сброс воды в нижний бьеф за май—ноябрь составляет 58% от общего годового сброса, можно утверждать, что величина мутности в указанный период в значительной степени определяет ее среднегодовое значение. Основными факторами, обуславливающими количество и состав взвесей в это время в Главном плесе, являются взмучивание донных отложений, определяемое ветровым режимом, и развитие фитопланктона. Поскольку ветровые условия в летне-осенний период 1967 г. (табл. 4), так же как и величина продукции фитопланктона под 1 м² (табл. 2), были близки к среднемноголетним, мы сочли возможным при расчетах многолетнего сброса взвешенных веществ через Рыбинскую ГЭС использовать среднегодовую мутность в 1967 г. (6.7 г/м³). Среднегодовой расход взвешенных веществ, по нашим подсчетам, равен 6.7 кг/сек., а сток за 25-летний период составляет 5300 тыс. т.

Т а б л и ц а 4

Среднемесячные скорости ветра по данным гидрометеостанции
«мыс Рожновский» (м/сек.)

Период наблюдений, годы	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	Теплый период
1967	4.5	4.9	4.9	4.9	5.7	7.3	6.3	5.4
1951—1962 (по Гущиной, 1966)	4.8	4.9	5.0	5.1	6.1	6.2	6.2	5.4

Размыв берегов и дна водоема. Общая величина этой статьи баланса (табл. 5) получена как разность между суммой расходных статей и суммой

Т а б л и ц а 5

Ориентировочный баланс взвешенных веществ в Рыбинском водохранилище
(абсолютно сухой вес) за период 1941—1965 гг.

Приход	Тыс. т	Расход	Тыс. т
Сток наносов рек	19 000	Накопление донных отложений	103 200
Продукция фитопланктона	2 500	Сток через гидроузлы	5 300
Размыв сплавин	5 280		
Размыв берегов и дна	81 720		
Всего	108 500	Всего	108 500

первых трех приходных статей баланса. Эта составляющая приходной части баланса имеет наибольшую величину. О значительных размерах поступления взвешенного материала из указанного источника свидетельствуют данные о фактическом переформировании берегов и мелководий на некоторых участках водохранилища. Общая длина абразионных берегов по обследованию 1961 г. составляет 152 км, или 9% от длины береговой линии водохранилища (Иванов, 1965). Места абразии берегов расположены в основном в речных плесах водохранилища. Существенные различия волнового режима и геолого-морфологического строения абразионных берегов обусловили различную интенсивность их переформирования. Объем переформированного грунта на 1 пог. м берега к 1963 г. составил, по данным Рыбинской гидрометеорологической обсерватории, 47—527 м³. Коэффициент аккумуляции на разных участках колебался в пределах 10—90%. Это означает, что значительная доля переработанного материала

откладывалась в пределах сравнительно узкой полосы береговой отмели (10—160 м), а остальная часть поступала в глубоководные части водоема. Продукты размыва берега, слагающие береговую отмель, при определенном сочетании уровня и волнения подвергались взмучиванию, и также частично поступали в глубоководную зону.

Если принять условно средний объем береговых переформирований на 1 пог. м абразионного берега равным средней из наблюденных величин (около 190 м^3 на пог. м), то общее поступление материала из этого источника равно $28.5 \cdot 10^6 \text{ м}^3$, или около 46 000 тыс. т (при средней пористости 40% и удельном весе 2.7 т/м^3). Следовательно, ориентировочно можно считать, что около половины четвертой приходной статьи баланса составляет размыв берегов. В дальнейшем, по мере приближения профилей береговых склонов к устойчивым, поступление взвешенного материала за счет переформирования берегов будет уменьшаться. Так, по прогнозу, рассчитанному методом Н. Е. Кондратьева, среднегодовой объем переформирований в 70—90-е годы будет примерно в три раза меньше, чем в 40—60-е годы (Иванов, 1965).

Волновое воздействие на дно водоема не ограничивается узкой полосой береговой отмели. При определенном соотношении высот волн и глубин водоема оно распространяется на всю прибрежную мелководную зону и районы подводных возвышенностей в глубоководной зоне. Явление размыва мелководий (понижение отметок дна, сокращение площади островов) установлено на Куйбышевском водохранилище В. М. Широковым (1964), на Горьковском — Н. А. Ярославцевым (1964). На Рыбинском водохранилище, где глубины 0—2 м занимают 21% площади водоема, глубины 0—6 м — 37%, а разгоны волны достигают нескольких десятков километров, размыв мелководий должен происходить в больших размерах, чем в водохранилищах долинного типа.

Для получения представления о формировании рельефа и грунтов мелководий водохранилища нами проведены исследования нескольких мелководных участков в Волжском и Главном плесах, включающие детальные топографические съемки и повторные нивелировки постоянно закрепленных профилей (Зиминова и Курдин, 1968а). В результате этих работ было установлено, что при формировании рельефа дна мелководий происходит нивелирование его поверхности с понижением отметок размываемых участков и с удалением за границы мелководий части сортируемого грунта. Абсолютные отметки исследуемых участков понизились за 25-летний период на 1.5 м, а уменьшение их первоначального объема составило 5—14%. Грунт, вынесенный за пределы мелководий, состоял в основном из частиц диаметром менее 0.1 мм. Величина элементарного размыва (отношение объема размываемого грунта к площади соответствующей горизонтали) на исследованных участках составляла 0.4—0.6 м на уровне критической горизонтали, т. е. той, на которой размыв сменяется аккумуляцией. Существенные различия в механическом составе первичных грунтов мелководий, а также в гидродинамической активности водной массы на разных участках не позволяют распространять полученные величины элементарного размыва на весь водоем и рассчитывать количество материала, поступившего в него за счет размыва мелководий. Однако полученные величины элементарного размыва в сочетании с почти повсеместным размывом мелководья в Главном плесе свидетельствуют о том, что этот источник взвешенного вещества нельзя не учитывать при составлении его баланса.

Вторым важным результатом исследований мелководий был вывод о завершении к началу 60-х годов их интенсивного переформирования. Доказательством этого является совпадение расчетных отметок устойчивого профиля дна с наблюдаемыми в настоящее время, высокая степень

сортировки частиц грунта, появление плаща наносов на поверхности мелководий и постоянство отметок при повторных нивелировках.

Таким образом, в районах мелководий за период, для которого составляется баланс взвешенных веществ, достигнуто равновесие между гидродинамической активностью водной массы и механическим составом грунта. Следовательно, в будущем нельзя ожидать значительного поступления взвесей в глубоководные участки водохранилища за счет размыва мелководий, и эту статью из баланса взвешенных веществ можно будет исключить.

Произведенные балансовые расчеты показывают, что в первые 25 лет существования водохранилища ведущую роль в накоплении донных отложений, которые являются основным видом накопления вещества в водоеме такого типа (Россолимо, 1964), играет автохтонное взвешенное вещество, поступление которого обусловлено действием аazonальных факторов (размыв берегов, ложа водоема и торфяных сплавин). Действие этих факторов привело к созданию в водохранилище специфического грунтового комплекса, основные типы грунтов которого характеризуются повышенным в сравнении с грунтами большинства долинных водохранилищ содержанием органического вещества. Эта особенность грунтового комплекса водохранилища обусловлена интенсивной переработкой почвенного слоя затопленной суши и размывом сплавин.

Обычно при расчетах заиления водохранилищ фактор переработки ложа не учитывается. Для глубоководных водохранилищ долинного типа, где воздействие волнения на дно ограничивается узкой полосой прибрежной отмели, это вполне оправдано. Но для крупных озеровидных водохранилищ, затопивших значительные пространства водоразделов, игнорирование такого фактора может привести к большим просчетам. Так, по прогнозу, составленному без учета местных источников грунтообразующего материала, объем заиления Рыбинского водохранилища должен был составить к 1965 г. 0.035 км^3 , фактически же он оказался равным 0.28 км^3 .

Середину 60-х годов можно условно считать рубежом, за которым начинается новый этап в формировании грунтового комплекса водохранилища, отличающийся от предыдущего меньшим набором источников грунтообразующего материала. Процесс перестройки грунтового комплекса водоема является следствием тех изменений в балансе взвешенных веществ, которые начались в конце исследуемого нами периода. В 60-е годы, как уже указывалось, резко уменьшился размыв сплавин и сократилось поступление грунтообразующего материала, вырабатываемого при формировании мелководий, так как этот процесс в основном закончился. В результате уменьшения поступления взвешенного вещества из этих источников происходит погребение торфянистого и переходного илов Главного плеса под серым илом и увеличение органического вещества в верхних слоях серого ила в речных плесах (Курдин и Зиминова, 1968). Эти изменения необратимы, поскольку поступление взвесей за счет переформирования берегов и в дальнейшем будет уменьшаться, а размыв сплавин и мелководий можно будет совсем исключить из баланса. Остальные приходные статьи баланса взвешенных веществ в будущем не претерпят существенных изменений, если не считать уменьшения годового стока наносов, которое отмечалось в последние годы исследуемого нами периода вследствие создания Шекснинского водохранилища.

Учет происходящих в балансе изменений позволяет высказать некоторые предположения относительно средней величины годового поступления взвешенных веществ в будущем. Если исключить из приходной части баланса размыв сплавин и мелководий и принять, что интенсивность переформирования берегов уменьшится втрое, то суммарная вели-

чина годового прихода взвешенных веществ уменьшится приблизительно в 2.5 раза. При условии сохранения существующего режима эксплуатации водохранилища сброс взвешенных веществ через гидроузел останется прежним, а годовое осадконакопление уменьшится в три раза. На фоне общего снижения интенсивности осадконакопления возрастет роль зональных факторов этого процесса, к которым мы относим сток взвешенных наносов рек и продукцию фитопланктона. Их доля в общем приходе взвешенного вещества в водоем увеличится от 20 до 40 %. Вместе с тем в связи с сокращением поступления взвешенного органического вещества из местных источников возрастет доля аллохтонных органических взвесей в общем балансе.

Составленный баланс убедительно показывает, что количество взвешенных веществ, поступающих в водохранилище с водосбора, значительно превышает сброс в нижний бьеф. Превышение прихода наносов над расходом сохранится и в будущем. Однако следует помнить, что соотношение прихода и расхода наносов, которое может быть получено путем сопоставления соответствующих статей баланса, не отражает истинной аккумуляции речных наносов в водохранилище. Исследования количества и состава взвесей Рыбинского водохранилища показали, что большая часть наносов, приносимых реками, осаждается в речных плесах и на выходе из них (Зиминова, 1963, 1965). Это означает, что фактическая аккумуляция речных наносов в водохранилище более значительна, чем учитываемая соотношением прихода и расхода, а в сбросе через плотину преобладают автохтонные взвеси, образование которых в водоеме, как свидетельствует составленный баланс, весьма значительно. Оценка изменений в составе стока наносов является, на наш взгляд, одной из основных задач в проблеме трансформации стока водохранилищами.

ЛИТЕРАТУРА

- Белавская А. П. и Т. Н. Кутова. 1966. Растительность зоны временного затопления Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 11 (14).
- Винберг Г. Г., Э. А. Шушкина и Г. А. Печень. 1965. Продукция ракообразных озерного планктона. Зоол. журн., т. 44, вып. 1.
- Гущина Л. А. 1966. Ветровой режим Рыбинского водохранилища. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 3, Л.
- Дегтеревский В. К. 1958. Физико-географическое районирование Ярославской области. Уч. зап. Ярославск. гос. пед. инст., вып. XX, ч. 2.
- Зиминова Н. А. 1963. Количественная характеристика взвесей Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 6 (9).
- Зиминова Н. А. 1965. Состав взвесей Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (10).
- Зиминова Н. А. и В. П. Курдин. 1968а. Формирование рельефа и грунтов мелководий Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 16 (19).
- Зиминова Н. А. и В. П. Курдин. 1968б. Накопление донных отложений в Рыбинском водохранилище. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 16 (19).
- Зиминова Н. А. и В. П. Курдин. 1969. О величине объемного веса грунтов Рыбинского водохранилища. Метеорол. и гидрол., № 6.
- Зиминова Н. А., В. П. Курдин. 1970. Сток взвешенных наносов притоков Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 19 (22).
- Иванов В. С. 1965. Прогноз переформирования берегов Рыбинского водохранилища. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 2, Л.
- Караушев А. В. 1963. Пути изучения речных наносов. Тр. Гос. гидрол. инст., вып. 100.
- Корелякова И. Л. 1958. Некоторые наблюдения над распадом перезимовавшей прибрежно-водной растительности Рыбинского водохранилища. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 1.
- Кузнецов С. И. 1955. Роль микроорганизмов в круговороте веществ в водоемах. М.
- Кузнецов С. И. и Н. С. Карпова. 1966. Динамика численности бактерий в Рыбинском водохранилище в 1961 и 1962 гг. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 13 (16).

- Кузнецов С. И., В. И. Романенко и Н. С. Карпова. 1966. Численность бактерий и продукция органического вещества в водной массе Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 13 (16).
- Кузнецов С. И., В. И. Романенко, Н. С. Карпова. 1967. Численность бактерий и продукция органического вещества в Рыбинском водохранилище в 1965 г. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 15 (18).
- Кузнецов С. И., В. И. Романенко, Н. С. Карпова, В. А. Романенко. 1970. Численность бактерий и продукция органического вещества в Рыбинском водохранилище в 1967 г. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 21 (24).
- Курдин В. П. 1960. О классификации и происхождении грунтов водохранилищ. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 8—9.
- Курдин В. П. и Н. А. Зимина. 1968. Изменение количества органического вещества в илистых отложениях Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 16 (19).
- Лебедев В. В. 1955. Гидрология и гидрометрия в задачах. Л.
- Лисицина К. Н. 1968. Определение среднего многолетнего расхода наносов при учете физико-географических условий. Тр. Гос. гидрол. инст., вып. 156.
- Луферова Л. А. и А. В. Моначов. 1966. Зоопланктон Рыбинского водохранилища в 1956—1963 гг. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 12 (15).
- Пырина И. Л. 1966. Первичная продукция фитопланктона в Ивановском, Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах в зависимости от некоторых факторов. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 13 (16).
- Романенко В. И. 1966. Характеристика микробиологических процессов образования и разрушения органического вещества в Рыбинском водохранилище. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 13 (16).
- Романенко В. И. 1967. Сравнение кислородного и радиоуглеродного методов определения интенсивности фотосинтеза фитопланктона. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 15 (18).
- Россолимо Л. Л. 1964. Основы типизации озер и лимнологического районирования. В кн.: Накопление вещества в озерах. М.
- Рутковский В. И. и Т. Н. Курдина. 1959. Водный баланс Рыбинского водохранилища за период с 1947 по 1955 г. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 1 (4).
- Скопинцев Б. А. 1947. О скорости разложения органического вещества отмершего планктона. ДАН СССР, т. 58, № 8.
- Сорокин Ю. И. 1958. Первичная продукция органического вещества в водной толще Рыбинского водохранилища. Тр. Биол. ст. «Борок» АН СССР, вып. 3.
- Тачалов С. Н. 1965. Динамика изменения затопленной древесной растительности и торфяных славин на Рыбинском водохранилище. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 2, Л.
- Широков В. М. 1964. Материалы стационарных наблюдений за формированием берегов и отмелей Куйбышевского водохранилища. Сб. работ Комсомольской гидрометеорол. обсерв., вып. 3, Куйбышев.
- Шушкина Э. А., Г. А. Печень. 1964. Рационы питания и усвоение пищи хищными циклопами и *Daphnia longispina*, определенные радиоуглеродным методом. В кн.: Биологические основы рыбного хозяйства на внутренних водоемах Прибалтики. Минск.
- Ярославцев Н. А. 1964. Динамика наносов прибрежной зоны Горьковского водохранилища. Сб. работ по гидрологии Гос. гидрол. инст., № 4, Л.

БАЛАНС ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ
В УГЛИЧСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Уравнение баланса взвешенных веществ в Угличском водохранилище составлено на основе результатов исследований режима взвесей в верхне-волжских водохранилищах (Зимина, 1967; Зимина, Курдин, 1968а). В целом оно аналогично таковому для Рыбинского водохранилища и в общем виде может быть представлено так:

$$N_{\text{Ив.}} + N_p + B + \text{ПР} = O + \text{Сб} + V,$$

где $N_{\text{Ив.}}$ — сток наносов в растворе Ивановской ГЭС; N_p — сток речных наносов; B — размыв берегов; ПР — продукция планктона и высшей водной растительности; O — осадконакопление; Сб — сброс взвесей через Угличскую ГЭС; V — содержание взвесей в водной массе в конце расчетного периода.

За расчетный период был принят ряд продолжительностью 29 лет (1940—1968 гг.). Малочисленность имеющегося материала не позволяет уменьшить продолжительность расчетного периода. Элементы баланса, которые в многолетнем разрезе не имеют тенденции изменяться однозначно, вычислялись по среднемноголетней величине, определенной тем или иным способом. Остальные балансовые составляющие определялись как результирующие величины за весь расчетный период.

Сток взвешенных наносов в водохранилище складывается из стока наносов через Ивановский гидроузел и стока боковых притоков. Наблюдения над мутностью в створе Ивановского гидроузла проводились нами в течение 1968 г. Для определения средней мутности за расчетный период применялся метод теоретической кривой обеспеченности (Лебедев, 1955). Были определены параметры кривой обеспеченности годового стока воды в створе плотины по имеющемуся ряду наблюдений за период 1938—1968 гг. Для построения кривой обеспеченности годового стока наносов в створе плотины приняты равенство обеспеченности модульных коэффициентов стока воды и наносов и рекомендованное Г. В. Лопатыным (1952) для равнинных рек соотношение коэффициентов вариации стока воды и наносов.

Применение такого приема при расчете зарегулированного стока, на наш взгляд, допустимо по следующим соображениям. Максимальные величины мутности, так же как и максимальные величины стока наносов в створах плотин Ивановской и Угличской ГЭС, отмечаются в период половодья. Вследствие малых объемов этих водохранилищ большая часть половодья проходит через них транзитом и колебания годового стока в створах этих ГЭС, определяемые главным образом колебаниями

весеннего стока, характеризуются такими же коэффициентами вариации, как и колебания стока незарегулированных рек данного бассейна.

По полученной кривой обеспеченности модульных коэффициентов стока наносов и известной обеспеченности модульного коэффициента в год наших наблюдений определено его значение и величина нормы стока наносов — 5.35 кг/сек. Средняя расчетная многолетняя мутность в створе плотины Ивановской ГЭС равняется 21.8 г/м³, среднемноголетний сток наносов — 169 тыс. т, сток за период 1940—1968 гг. — 4900 тыс. т.

Сток наносов боковых притоков водохранилища не изучен. Сведения о нем имеются лишь для створа Дубна—Вербилки за период 1965—1966 гг. При расчетах мы воспользовались методом аналогии; за среднемноголетнюю мутность притоков принималась мутность рек, расположенных в бассейнах Ивановского и Рыбинского водохранилищ и характеризующихся сходством основных условий, определяющих величины мутности (водность, величина площади бассейна, заболоченность, залесенность, уклоны). Для определения водного стока была использована несколько видоизмененная схема, примененная Т. Н. Курдиной (1959) при водно-балансовых расчетах. Сток с неизученной площади бассейнов Дубны, Нерли, Медведицы определялся по модулям этих рек в створах, замыкающих площадь с инструментальными наблюдениями. Сток с бассейнов малых рек, ручьев и межбассейновых пространств, следуя рекомендациям В. И. Колкутина (1966), — по модулям стока р. Малицы (бассейн Волги, приток р. Межурки, площадь водосбора у замыкающего створа 10.9 км²), отличающейся значительной изменчивостью стока внутри года.

Для расчета среднемноголетнего стока наносов р. Дубны была взята ее среднемноголетняя мутность в створе Вербилки. Сток наносов р. Нерли рассчитывался по мутности р. Волчины — в створе Волчинское лесничество, р. Медведицы — по р. Тверце в створе Медное, малых рек — по р. Юхоти в створе Глоднево. Среднемноголетняя мутность рек-аналогов определена методом теоретической кривой обеспеченности. Как следует из данных табл. 1, первое место по величине стока наносов среди боковых притоков занимает Дубна, затем идут Медведица и Нерль. В соответствии с этим находятся размеры конусов выноса в устьях этих притоков.

Т а б л и ц а 1

Среднемноголетний сток взвешенных наносов притоков
Угличского водохранилища

Река	Водный сток, млн м ³	Мутность, г/м ³	Сток наносов, тыс. т
Волга, Ивановская ГЭС	7745	21.8	169
Дубна	962	38.2	37
Нерль	675	6.4	4
Медведица	1168	18.7	22
Остальные притоки	465	31.6	15
Всего	—	—	247

Общая величина стока наносов в водохранилище за 1940—1968 гг. составила 7160 тыс. т. Ежегодные величины стока наносов по всем рекам были рассчитаны за период 1954—1964 гг. Сравнение общего годового стока наносов в водохранилище со стоком наносов в створе Ивановской ГЭС показало, что последний составляет в среднем 70% от общего с колебаниями от 63 до 78% в течение 1954—1964 гг.

Полученное среднее соотношение было использовано при вычислении ориентировочных величин общего стока наносов за периоды 1942—1953 и 1965—1968 гг.

Размыв берегов. Протяженность абразионных берегов Углицкого водохранилища, по обследованиям Рыбинской гидрометеорологической обсерватории, равна 86 км, или 13% от общей длины береговой линии. По наблюдениям на участках у деревень Красное и Васисино, суммарные объемы обрушенного грунта за период 1939—1964 гг. составили 87.5 и 69.5 м³ на 1 пог. м берега. При пересчете в весовые единицы это составляет в среднем 124.7 т на 1 пог. м, или 10 700 тыс. т для всех абразионных берегов за указанный период. Эту величину следует расценивать как ориентировочную, поскольку интенсивность абразии на других участках, не охваченных наблюдениями, может отличаться от принятой при расчете.

Для процесса абразии берегов водохранилища характерна тенденция к постепенному уменьшению его интенсивности по мере увеличения срока существования водоема. Это может быть проиллюстрировано следующими цифрами. За 12-летний период (1939—1951 гг.) среднегодовой объем обрушенного грунта на обследованных участках был равен 4 м³ на пог. м берега, в следующее десятилетие (1952—1961 гг.) он составил уже 2.6, в 1962 г. — 2.9, в 1963 г. — 1.6 м³, а в 1964 г. абразии берега не наблюдалось совсем. Пересчет указанных величин в весовые показатели, что поступление взвешенного вещества в чашу водохранилища за счет переформирования берегов до 1951 г. превышало суммарный сток взвешенных наносов в 2.3 раза, в последующее десятилетие они были примерно одинаковы, а в начале 60-х годов сток речных наносов превосходил поступление материала за счет береговой абразии.

Наблюдений за размывом мелководий на водохранилище не производилось. Исходя из морфологических и морфометрических особенностей водоема и размеров ветрового волнения на нем, можно полагать, что масштабы этого явления менее значительны, чем на Рыбинском водохранилище (Зиминова, Курдин, 1968б).

Наиболее сильное волнение может развиваться на нижнем участке — между р. Пикшей и г. Угличем, где имеют место самые большие разгоны, однако и здесь они незначительны. При ветрах северных и южных направлений разгон волны может достигать 10 км, а при восточных и западных — 2 км. В табл. 2 для приведенных разгонов даны высоты волн 15%-й обеспеченности и глубина их размывающего действия. Рассчитанные В. П. Курдиным (1963) высоты волн найдены по номограммам А. П. Браславского с введением коэффициента для перехода к указанной обеспеченности, поскольку она принимается при расчете береговых переформирований (Кондратьев, 1960). Ветер 20 м/сек. является для районов водохранилища исключительным и наблюдается не каждую навигацию. При наиболее часто повторяющихся сильных ветрах (10—15 м/сек.) и наибольших разгонах глубина размывающего действия волны равна 1 м. С учетом

Таблица 2

Высота волн (h , м) и глубина их размывающего действия (H , м) для условий Углицкого водохранилища на участке р. Пикша—г. Углич (по Курдину, 1963)

Разгон волны, км	h	H
Скорость ветра 5 м/сек.		
2.0	0.2	0.2
10.0	0.3	0.3
Скорость ветра 10 м/сек.		
2.0	0.4	0.4
10.0	0.6	0.7
Скорость ветра 20 м/сек.		
2.0	0.8	1.0
10.0	1.3	2.0

средней навигационной сработки (0.7 м) размывающее действие волнения распространяется до глубины 1.7 м от НПУ. Глубины до 1.7 м составляют 31 % площади дна водохранилища, причем большая часть мелководий расположена на участках, не доступных значительному волнению (заостровные пространства на участке Белый Городок—Калязин и заливы).

Часть мелководий, подверженных воздействию волнения, представляет собой береговые отмели, сформированные из продуктов абразии надводного склона. Переформирование таких мелководий означает дальнейшее перемещение продуктов абразии берега в глубь водоема. Надо полагать, однако, что размыв таких мелководий не может быть весьма значительным, так как грунт аккумулятивной части отмели уже пересортирован.

Таким образом, вещество, поступающее в водоем при размыве мелководий, в какой-то мере учитывается при введении в баланс результатов береговых переформирований. Степень этого учета трудно оценить без проведения специальных наблюдений.

Продукция планктона и высшей водной растительности. Сведения о величине продукции фитопланктона Угличского водохранилища ограничиваются единичными измерениями Ю. И. Сорокина (1961), которые не могут быть использованы для расчетов годовой величины продукции. Анализ сезонной динамики численности и биомассы фитопланктона показывает, что он формируется в основном из фитопланктона Иваньковского водохранилища, сохраняя тот же видовой состав и количественные соотношения отдельных групп. Средние за вегетационный период биомассы фитопланктона Угличского и Иваньковского водохранилищ также близки между собой (Буторина, 1961, 1966). Исходя из этого, мы сочли возможным рассчитать в первом приближении первичную продукцию в Угличском водохранилище по результатам наблюдений над продуцированием органического вещества в Иваньковском водохранилище. По данным И. Л. Пыриной (1966), общее количество сухого органического вещества, синтезируемое фитопланктоном за год, в Иваньковском водохранилище составляет 459 г/м². В пересчете на площадь Угличского водохранилища это дает величину продукции фитопланктона, равную 114 тыс. т сухого органического вещества. Принимая, что около 85 % первичной продукции фитопланктона относятся к нестойкому органическому веществу, минерализующемуся в течение нескольких дней, получим количество взвешенного органического вещества, участвующего в процессах седиментации и переноса взвесей в водоеме, равное 17 тыс. т в год, или 493 тыс. т за весь расчетный период (1940—1968 гг.).

Продукция зоопланктона при составлении баланса взвесей не учитывалась. Исходя из опыта аналогичных расчетов для Рыбинского водохранилища и учитывая, что соотношение средней за вегетационный период биомассы фито- и зоопланктона в Угличском водохранилище такое же, что и в Рыбинском (Мордухай-Болтовская, 1959; Буторина, 1966), можно полагать, что величина продукции зоопланктона значительно ниже продукции фитопланктона и находится в пределах ошибки его определения.

Годовая продукция прибрежно-водной растительности, по определению В. В. Экзерцевой (1961), составляет 4.2 тыс. т абсолютно сухого веса. Принимая, что в среднем около 50 % биомассы высшей водной растительности минерализуется (Корелякова, 1958), получим общую величину поступления взвешенного вещества из этого источника за расчетный период, равную 61 тыс. т. Таким образом, поступление взвешенного вещества за счет вегетации фитопланктона и прибрежно-водной растительности составило в сумме 554 тыс. т в сухом весе.

Сброс взвесей через Угличский гидроузел. В 1967—1968 гг. нами были проведены наблюдения над мутностью в водоводах Угличской ГЭС. Средние годовые расходы взвесей за эти годы, подсчитанные по хронологическому графику мутности и ежедневным расходам воды в створе гидроузла, равны соответственно 2.14 и 4.54 кг/сек. Оба указанных года характеризовались высокой обеспеченностью водного стока, что препятствует прямому использованию полученных результатов при расчетах среднегодовой величины стока взвесей. Для расчета последней был применен указанный выше метод теоретической кривой обеспеченности. Среднегодовой расход взвесей в створе гидроузла, определенный этим методом, равен 6.94 кг/сек. Сток взвешенных веществ через Угличскую ГЭС за расчетный период равняется 6348 тыс. т. Многолетние колебания стока взвесей в створе гидроузла соответствуют колебаниям суммарного стока речных наносов в водохранилище.

Накопление донных отложений. Для определения объема вторичных донных отложений в водохранилище были использованы материалы грунтовых съемок 1967—1968 гг. Было установлено, что интенсивность заиления водохранилища и средняя высота слоя отложений возрастают в направлении от верховьев водохранилища к плотине.

Основная часть взвесей седиментируется в русловых углублениях, на глубинах более 9 м. В зависимости от характера распределения донных отложений и изменения средней высоты их слоя по длине водоема было выделено 5 участков, в пределах которых условия накопления взвесей одинаковы. Объем заиления каждого участка вычислялся как сумма объемов заиления площадей дна в определенных интервалах глубин. Объемный вес каждого типа отложений определялся по описанной ранее методике (Зиминова, Курдин, 1969б). Помимо этого способа определения объема заиления была сделана попытка вычислить его по кривым $h=f(F)$, где h — высота слоя отложений; F — площадь водного сечения. Кривые построены для интервалов глубин 0—9 и более 9 м. По кривым определялся средний слой отложений в пределах 19 выделенных 5-километровых участков, на которые разбито все водохранилище, затем вычислялись объем и вес отложений, которые суммировались для всего водоема. Оба способа дали весьма сходные результаты. Общий объем вторичных донных отложений водохранилища оказался равным 0.0123 км³, вес — 8030 тыс. т (Курдин, Зиминова, 1972).

Содержание взвесей в водной массе водохранилища в конце расчетного периода было определено как произведение объема водохранилища на среднюю мутность 31 декабря 1968 г. По наблюдениям в створе Угличской ГЭС, количество взвесей, сбрасываемых из водохранилища, в течение декабря 1968 г. колебалось в пределах 2.8—3.4 г/м³ и 31 декабря равнялась 2.8 г/м³. За среднюю для всего водохранилища была принята мутность 3.0 г/м³, исходя из того, что величина мутности в это время не испытывает существенных колебаний по длине водохранилища (Зиминова, Курдин, 1971). Общее содержание взвесей в водной массе оказалось равным 3.7 тыс. т, т. е. было ничтожно мало по сравнению со всеми статьями баланса (табл. 3).

Из данных табл. 3 следует, что невязка многолетнего баланса равна 4026 тыс. т, или 24% от уравненного баланса. Большая величина невязки обусловлена, очевидно, большими ошибками в определении отдельных статей баланса. Рассмотрим возможные источники ошибок и их величины в тех случаях, когда они поддаются оценке.

Основным источником ошибок при применении метода расчета среднегодовой величины стока взвешенных наносов по теоретической кривой обеспеченности является определение коэффициента вариации стока наносов (C_v) по соотношению $C'_v=1.6C_v$, где C_v — коэффициент вариации

Баланс взвешенного вещества в Угличском водохранилище за период
1940—1968 гг.

Приход	Тыс. т	% от общего прихода	Расход	Тыс. т	% от общего расхода
Сток наносов в створе Иваньковской ГЭС...	4900	27	Сброс взвесей через Угличскую ГЭС	6350	44
Сток речных наносов	2260	12	Осадконакопление	8030	56
Размыв берегов	10700	58	Содержание взвесей в водной массе в конце расчетного периода	4	0
Продукция планктона и высшей водной расти- тельности	550	3			
Всего	18410	100	Всего	14384	100

Невязка — 4026 тыс. т (24 %)

стока воды. Определив ошибки C_v при имеющихся у нас 15—30-летних рядах наблюдений над стоком воды, мы вычислили ошибку C'_v как ошибку произведения, в котором ошибки средних значений сомножителей известны. Предварительно на основе анализа использованного Г. В. Лопатиным (1952) материала была определена ошибка коэффициента 1.6 в 99%-м доверительном интервале. При C'_v , вычисленном с учетом положительной ошибки 99%-й обеспеченности, ошибка стока наносов в створе Иваньковской ГЭС составила около 980 тыс. т (20%), а для стока боковых притоков — 360 тыс. т (16%).

Оценить ошибку третьей приходной статьи баланса — поступления взвешенного вещества за счет размыва берегов — не представляется возможным в силу ограниченного количества наблюдений. Естественно, что распространение результатов наблюдений на двух ключевых участках на все абразионные берега водохранилища вносит погрешность в окончательный результат расчета.

Стандартная ошибка в определении среднего количества взвешенного вещества, поступающего в водохранилище в результате вегетации фитопланктона, для Рыбинского водохранилища, по которому имеется 8-летний ряд наблюдений, составляет около 20%, а ошибка 99%-й обеспеченности — 66%. По-видимому, для Угличского водохранилища, характеризующегося более однородными условиями формирования фитопланктона, она не должна превышать этой величины. Однако и при максимально возможных величинах указанной ошибки влияние ее на невязку баланса будет весьма незначительно.

Ошибка расчетов стока наносов в створе Угличской ГЭС вычислялась так же, как и для Иваньковской ГЭС. При C'_v 99%-й обеспеченности она равна 1200 тыс. т, или 19% от величины стока наносов.

При определении величины осадконакопления основным источником ошибок является неравномерное распределение вторичных отложений по площади водоема и колебания высоты их слоя в заданных интервалах глубин. Ошибки определения по карте площадей, занимаемых данными глубинами, и величин объемного веса различных типов донных отложений очень невелики и практически не оказывают влияния на конечный резуль-

тат расчета. Определенная исходя из этих предпосылок ошибка статьи «осадконакопление» составляет 21%.

Расчет суммарной ошибки балансового уравнения без учета ошибки третьей приходной статьи показывает, что имеющая место невязка вполне может быть обусловлена погрешностями в определении отдельных компонентов баланса. Можно полагать, что с наибольшей ошибкой вычислено поступление взвешенного материала за счет размыва берегов.

Определение погрешностей расчета для большинства компонентов баланса позволяет с известной степенью надежности оценить их роль в балансе. Как следует из табл. 3, в течение 29 лет существования водоема большая часть взвесей формировалась в самом водохранилище за счет размыва берегов и шла на образование вторичных донных отложений. Ведущая роль местных факторов в формировании донных отложений отмечалась нами и для Рыбинского водохранилища (Зиминова, Курдин, 1969а). Однако в силу своеобразия гидрологического режима и морфометрии этого большого водоема в нем помимо размыва берегов в формировании взвесей значительную роль играл размыв мелководий. В Угличском водохранилище данное явление, как уже указывалось, не имеет большого распространения. В отличие от Рыбинского в Угличском водохранилище доля взвешенных наносов рек в приходной части баланса в 2 раза больше. Это происходит не за счет большего развития процессов эрозии на водосборе (среднегодовое количество модулей стока наносов в бассейнах обоих водохранилищ почти одинаковы), а в силу сокращения некоторых источников автохтонного вещества (размыв мелководий, торфяных сплавин). Более однородный состав поступающих в водоем взвесей обусловил и характер вторичных отложений, представленных только серым песчаным и серым илом со сравнительно небольшим содержанием органического вещества (4.3—10.9%).

Приведенные в табл. 3 данные отражают суммарное соотношение отдельных компонентов баланса за весь исследуемый 29-летний период существования водохранилища. Естественно, что в отдельные годы и периоды эти соотношения были различны вследствие колебаний величин составляющих баланса. Наибольшие изменения во времени наблюдались в количестве вещества, поступающего за счет абразии берега, и заключались в постепенном уменьшении объема береговых переформирований. Вместе с тем колебания годового стока наносов и сброса взвесей из водоема не имели какой-либо однозначной тенденции и соответствовали друг другу. В результате по мере увеличения срока эксплуатации водоема происходило постепенное уменьшение общего прихода взвешенного вещества в водоем и уменьшение величины осадконакопления. На основе имеющихся в нашем распоряжении данных по суммарному объему береговых переформирований за периоды 1940—1951, 1952—1961 и 1962—1968 гг., а также по рассчитанному за эти же периоды стоку речных наносов и сбросу взвесей через Угличскую ГЭС мы определили ориентировочно долю отдельных компонентов в балансе за указанные периоды (табл. 4).

Как следует из данных табл. 4, в приходной части баланса происходит относительное возрастание роли речных наносов и планктона за счет уменьшения поступления абразийного материала, в расходной — почти вдвое увеличивается относительная величина сброса взвесей через Угличский гидроузел.

Количественная характеристика компонентов баланса взвесей, а также исследования ложа водохранилищ Верхневолжского каскада, являющихся наиболее старыми в нашей стране крупными искусственными водоемами со сроком эксплуатации 30 лет и более, позволяют нам высказать ряд соображений по поводу общей направленности процесса формирования ложа водохранилищ.

Компоненты баланса, % от общего прихода (расхода)

Статья	1940—1951 гг.	1952—1961 гг.	1962—1968 гг.	1940—1968 гг.
П р и х о д				
Сток наносов	29	45	63	39
Размыв берегов	68	52	30	58
Планктон и высшая водная растительность	3	3	7	3
Р а с х о д				
Сброс взвесей через Угличскую ГЭС . . .	35	50	68	44
Осадконакопление . . .	65	50	32	56

Основываясь на изменении интенсивности процессов седиментации и береговой абразии, В. М. Широков (1968) выделил 2 этапа в формировании ложа водоема. Первый — становление подводного рельефа и интенсивная седиментация, второй — стабилизация и слабая седиментация. На наш взгляд, предлагаемая схема справедлива лишь частично. Нельзя не согласиться с наличием двух периодов — интенсивной и слабой седиментации. Однако нельзя отождествлять их с периодами становления и стабилизации. Само понятие «ложе водоема» включает в себя, по-видимому, не только рельеф дна, но и всю совокупность грунтов, обладающих определенным комплексом физико-химических свойств. Исходя из этого, в период становления ложа должно происходить интенсивное формирование рельефа дна (строго говоря, его мезо- и микроформ, поскольку сам рельеф дна определяется рельефом затопленной суши) и образование характерного для водоема грунтового комплекса с определенными физико-химическими показателями, который в дальнейшем, в период стабилизации, остается относительно постоянным, т. е. не испытывает каких-либо необратимых изменений под влиянием внешних факторов. Оба этих процесса — интенсивное формирование рельефа и устойчивого грунтового комплекса — значительно более растянуты во времени, чем период интенсивной седиментации. Само утверждение, что водоем вступает в фазу стабилизации после ослабления абразионной деятельности водной массы и снижения темпов седиментации заключает в себе некоторое противоречие. Снижение темпов седиментации происходит в результате полного или частичного прекращения поступления взвесей из одного или нескольких основных источников грунтообразующего материала. В составе грунтов начинают происходить необратимые изменения, которые тем значительнее, чем больше различия в составе взвесей, поступающих из разных источников. Происходит постепенная замена существующего грунтового комплекса новым, состав грунтов которого соответствует новому набору источников грунтообразующего материала. Таким образом, вряд ли применимо к этому состоянию ложа водоема название «стабилизация». Именно по такой схеме идет становление ложа Рыбинского водохранилища (Курдин, Зиминова, 1970). Видимо, с уменьшением поступления абразионного материала можно ожидать изменений и в составе грунтов Угличского водохранилища. Естественно, что вследствие низких темпов седиментации эта фаза периода становления более длительна. Так, на Рыбинском водохранилище после 30 лет его эксплуатации формирование рельефа дна закончилось примерно

на 70% площади водоема и продолжается существенная перестройка грунтового комплекса, образовавшегося в фазу интенсивной седиментации. На Угличском водохранилище при средних за 1962—1968 гг. темпах осадконакопления для образования сантиметрового слоя отложений, отличающихся по составу от существующих, понадобится около 20 лет. В связи с изложенным вызывает сомнение утверждение, что водохранилище после полутора десятка лет эксплуатации может приблизиться к стадии стабилизации (Матарзин и др., 1968).

Характерной особенностью Угличского водохранилища, выявленной при сопоставлении составляющих баланса, является большая величина отношения расхода наносов к их приходу. По результатам исследований на крупных долинных водохранилищах сезонного регулирования сброс взвесей в нижний бьеф составляет 2—30% от стока речных наносов в водохранилище. В Угличском водохранилище данное соотношение достигает 90%, т. е. количественная трансформация годового стока речных наносов водохранилищем незначительна. Это противоречит существующим представлениям о водохранилище как отстойнике, уменьшающем сток речных наносов. Причины столь незначительного влияния водохранилища на сток наносов Волги заключаются прежде всего в характере регулирования водного стока. Большая часть весеннего половодья проходит через водохранилище транзитом (среднегодовое весеннее приток превышает полезный объем водохранилища почти в 8 раз). В результате большой проточности водоема весной не происходит значительной аккумуляции речных наносов, различия между средними апрельскими и майскими значениями мутности в створах Ивановской и Угличской ГЭС невелики (Зиминова, Курдин, 1971).

В летне-осенний период различия между величинами мутности на входном и замыкающем створах также остаются небольшими, хотя скорости течения в водохранилище после прохождения половодья падают, и седиментация речных взвесей должна иметь место. Однако, как следует из приводимого баланса, весьма существенную роль в водоеме играют автохтонные взвеси, образование которых частично компенсирует уменьшение стока аллювиальных наносов. Это означает, что помимо количественной трансформации стока наносов происходит трансформация их состава. Отсутствие данных по составу наносов не позволяет пока оценить степень этой трансформации, но важность такой оценки в условиях комплексного использования водоемов не вызывает сомнений.

ЛИТЕРАТУРА

- Б у т о р и н а Л. Г. 1961. Фитопланктон Ивановского водохранилища в 1954—1956 гг. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 4 (7).
- Б у т о р и н а Л. Г. 1966. Фитопланктон Угличского водохранилища в 1954—1956 гг. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 11 (14).
- З и м и н о в а Н. А. 1967. Факторы, определяющие количество и состав взвешенных веществ в Рыбинском водохранилище. В кн.: Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. М.
- З и м и н о в а Н. А., В. П. К у р д и н. 1968а. Режим мутности Верхней Волги в условиях зарегулированного стока. Первая конф. по изуч. водоемов бассейна Волги. Тезисы докл. Тольятти.
- З и м и н о в а Н. А., В. П. К у р д и н. 1968б. Формирование рельефа и грунтов мелководий Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 16 (19).
- З и м и н о в а Н. А., В. П. К у р д и н. 1969а. Опыт составления баланса взвешенных веществ в крупном озеровидном водохранилище. Второе совещ. по вопросам круговорота веществ и энергии в озерных водоемах. Тезисы докл. Лиственничное на Байкале.
- З и м и н о в а Н. А., В. П. К у р д и н. 1969б. О величине объемного веса грунтов Рыбинского водохранилища. Метеорол. и гидрол., № 6.

- Зиминова Н. А., В. П. Курдин. 1971. О режиме взвесей в Угличском водохранилище. Информ. бюлл. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, № 9.
- Колкутин В. И. 1966. Водный баланс Угличского водохранилища. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 3, Л.
- Кондратьев Н. Е. 1960. Расчеты береговых переформирований на водохранилищах. Л.
- Корелякова И. Л. 1958. Некоторые наблюдения над распадом перезимовавшей прибрежно-водной растительности Рыбинского водохранилища. Бюлл. Инст. водохр. АН СССР, № 1.
- Курдин В. П. 1963. Условия формирования грунтового комплекса Угличского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 5 (8).
- Курдин В. П., Н. А. Зимичова. 1970. Пути формирования грунтового комплекса Рыбинского водохранилища. В кн.: Комплексные исследования водохранилищ. Изд. МГУ.
- Курдин В. П. и Н. А. Зиминова. 1972. О наносоудерживающей способности Угличского водохранилища. Наст. сб.
- Курдина Т. Н. 1959. Элементы гидрологического режима и водный баланс Угличского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2 (5).
- Лебедев В. В. 1955. Гидрология и гидрометрия в задачах. Л.
- Лопатин Г. В. 1952. Наносы рек СССР. М.
- Матарзин Ю. М., И. К. Мацкевич, Н. Б. Сорокина. 1968. О формировании рельефа дна Камских водохранилищ. Уч. зап. Пермск. гос. унив., метеорол. и гидрол., вып. 3.
- Мордухай-Болтовская Э. Д. 1959. Зоопланктон Иваньковского и Угличского водохранилищ в 1955—1956 гг. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 1 (4).
- Пырина И. Л. 1966. Первичная продукция фитопланктона в Иваньковском, Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах в зависимости от некоторых факторов. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 13 (16).
- Сорокин Ю. И. 1961. Продукция фотосинтеза в волжских водохранилищах в конце июня 1959 г. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 11.
- Широков В. М. 1968. Современные донные отложения крупных водохранилищ долинного типа в период становления. Тр. Сиб. н.-иссл. инст. энергетики, вып. 14, Новосибирск.
- Экзерцева В. В. 1961. Продукция прибрежно-водной растительности Угличского водохранилища. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 11.
-

О НАНОСОУДЕРЖИВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ УГЛИЧСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Условия формирования грунтового комплекса Угличского водохранилища, распределение и некоторые свойства основных типов его грунтов описаны в работе В. П. Курдина (1963). Исследования мощности вторичных отложений и их объемных весов позволили подойти к определению количества накопившихся отложений в водохранилище. Исходными данными послужили материалы грунтовых съемок 1967 и 1968 гг. За время съемок было выполнено 198 станций. Мощность вторичных донных отложений находилась по колонкам грунта, полученным с помощью грунтовой ударной трубки Государственного океанографического института. Спрессовывание колонки грунта от удара трубкой не учитывалось. Объемный вес грунтов определялся по методике, разработанной применительно к грунтовому комплексу Рыбинского водохранилища (Зиминова и Курдин, 1969).

Основным фактором, обуславливающим распределение вторичных донных отложений в водохранилище, являются стоковые течения (Курдин, 1963). С уменьшением скоростей течения в направлении к Угличскому гидроузлу наблюдается увеличение мощности вторичных грунтов и дисперсности слагающих их частиц, снижается объемный вес илистых отложений и возрастает их сорбционная способность.

Распределение мощности отложений, изменение площади водного сечения и величин сухого объемного веса грунтов по длине водохранилища представлено на рис. 1. Характер изменения мощности отложений, соответствующий изменению площади водного сечения, позволяет разделить водохранилище на 5 участков. В границах выделенных участков ввиду относительной однородности морфометрии и гидрологического режима условия накопления взвесей близки. Это позволяет осреднять значения нужных параметров внутри участков и принимать их за расчетные для определения заиления участка.

При подсчете накопления вторичных донных отложений применялся способ горизонтальных сечений (Зиминова и Курдин, 1968). На каждом расчетном участке в принятых интервалах глубин (0—3, 3—6, 6—9 и более 9 м) определялась средняя высота слоя отложений. Объем отложений в каждом интервале равняется произведению средней высоты слоя отложений на площадь, занимаемую глубинами данного интервала. Объемы заиления для каждого интервала глубин суммировались и таким образом определялся объем заиления всего участка.

Для определения веса донных отложений находился сухой объемный вес в заданном интервале расчетного участка по величине объемного веса

характерного типа отложений. Последующая схема расчета веса отложений на участке была такой же, как при определении объема отложений.

Величины накопления донных отложений по интервалам глубин в каждом выделенном участке за все время существования водохранилища (1940—1968 гг.), рассчитанные указанным способом, даны в табл. 1, а для всего водоема по тем же интервалам — в табл. 2. Из этих данных следует, что объем и интенсивность накопления донных отложений увеличиваются с глубиной. Исключение составляет V расчетный участок, где на глубинах более 9 м, характерных для русловой части, среднегодовое накопление отложений меньше, чем на других глубинах. Это объясняется на-

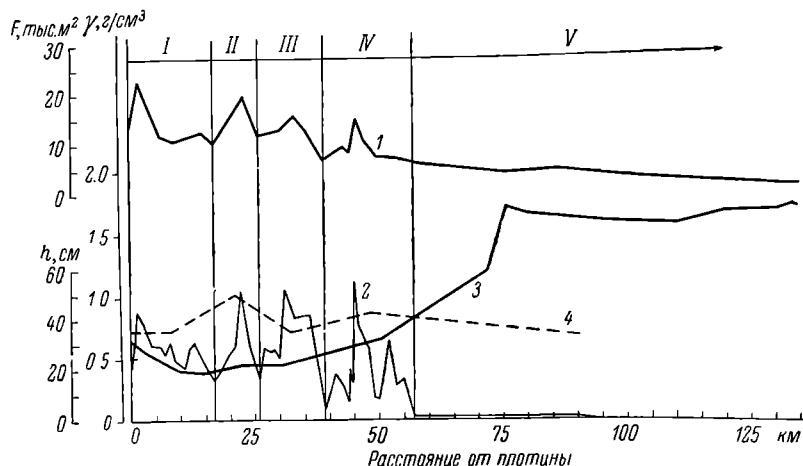


Рис. 1. Распределение мощности и сухого объемного веса отложений по длине Угличского водохранилища.

I—V — номера расчетных участков. 1 — площадь водного сечения (F); 2 — мощность вторичных грунтов по линии наибольших глубин (h); 3 — сухой объемный вес отложений по линии наибольших глубин; 4 — средний сухой объемный вес отложений в интервале глубин 0—9 м (γ).

личием заостренных пространств в прибрежной части участка, способствующих накоплению вторичных грунтов на мелководьях. В русловой части скорости течения в период паводка превышают критические и препятствуют образованию отложений. Значительный вес отложений, несмотря на наименьший объем заиления, в интервале глубин 0—3 м (табл. 2) вызывается обычными для этого пояса песчанистыми отложениями, обладающими наибольшим объемным весом.

Сопоставление изменений мощности вторичных грунтов с изменениями площади водного сечения по длине водохранилища (рис. 1) позволяет предполагать о существовании зависимости между указанными величинами. Для проверки этого предположения водохранилище, начиная от створа Угличской ГЭС, было разбито на 5-километровые участки. По каждому участку вычислена средняя мощность отложений и определена средняя площадь водного сечения в двух вариантах: для интервалов глубин 0—9 и более 9 м. Это позволило отделить отложения, образовавшиеся на бывших поймах, от отложений руслового углубления и при последующих расчетах вычислить вес накопившихся донных отложений, так как определить среднюю величину объемного веса отложений для всего диапазона глубин на каждом участке по имеющимся данным невозможно.

Для повторного подсчета объема и веса накопившихся донных отложений были использованы кривые зависимости мощности вторичных отложений от площади водного сечения, построенные по центрам тяжести групп

Таблица 1

Накопление и интенсивность образования донных отложений по интервалам глубин для расчетных участков Угличского водохранилища (1940—1968 гг.)

Участок, км от плотины	Интервал глубин, м	Тип отложений	Высота слоя к 1969 г., см	Средне-довое накопление, см	Объем, км³	Вес, тыс. т
I 0—17	0—3	Песок мелкий	4.5	0.16	0.00024	389
	3—6	Песчанистый серый и серый ил	4.3	0.15	0.00028	171
	6—9	Серый ил	6.6	0.24	0.00074	251
	>9	» »	23.6	0.84	0.00217	977
II 17—26	0—3	Песок мелкий и средний	1.5	0.05	0.00021	341
	3—6	Серый песчанистый ил	3.3	0.12	0.00028	166
	6—9	Серый ил	7.1	0.25	0.00052	184
	>9	» »	27.4	0.98	0.00104	437
III 26—39	0—3	Песок мелкий и пылеватый	3.5	0.12	0.00020	244
	3—6	Песчанистый серый и серый ил	6.2	0.22	0.00052	313
	6—9	Серый ил	8.7	0.31	0.00048	167
	>9	» »	29.8	1.06	0.00158	742
IV 39—57	0—3	Песок пылеватый и средний	2.2	0.08	0.00022	264
	3—6	Песчанистый серый и серый ил	2.7	0.10	0.00027	324
	6—9	То же	6.0	0.21	0.00021	252
	>9	» »	20.0	0.72	0.00118	779
V 57—136	0—3	» »	1.4	0.05	0.00101	607
	3—6	» »	2.6	0.09	0.00068	409
	6—9	Песок крупный, песчанистый серый ил	3.7	0.13	0.00049	586
	>9	Песок мелкий и илистый средний	1.1	0.04	0.00018	267
Всего			—	—	0.01250	7870

Таблица 2

Накопление донных отложений по интервалам глубин для Угличского водохранилища (1940—1968 гг.)

Интервал глубин, м	Объем, км³	Вес, тыс. т	Интервал глубин, м	Объем, км³	Вес, тыс. т
0—3	0.00188	1845	6—9	0.00244	1440
3—6	0.00203	1383	9	0.00615	3202
Всего				0.01250	7870

точек (рис. 2). Пользуясь кривыми $h=f(F)$, где h — средняя мощность отложений на участке водохранилища, а F — средняя площадь водного сечения этого участка, построенными для выбранных интервалов глубин, по величине средней площади водного сечения каждого заданного участка находили соответствующую ей мощность отложений. Произведение найденной по кривой мощности грунта на площадь дна участка дает объем заиления этого участка. Расчет ведется отдельно для каждого выбранного интервала глубин по соответствующей ему кривой. Объем накопления дон-

Накопление донных отложений по длине Угличского водохранилища
(1940—1968 гг.)

Участок, км от плотины	Объем, см ³	Вес, тыс. т	Примечание	Участок, км от плотины	Объем, км ³	Вес, тыс. т	Примечание
0—5	0.00178	1092	С плесом р. Пукши	50—55	0.00039	299	С плесом р. Нерль
5—10	0.00070	410		55—60	0.00027	217	
10—15	0.00090	527		60—65	0.00012	95	
15—20	0.00118	845		65—70	0.00007	66	
20—25	0.00205	1618		70—75	0.00020	171	
25—30	0.00087	574	С плесом р. Жабни	75—80	0.00014	115	С плесом р. Медведицы
30—35	0.00100	597		80—85	0.00007	70	
35—40	0.00065	407		85—90	0.00038	173	
40—45	0.00044	293		90—95	0.00004	36	
45—50	0.00085	585					
				Всего . .	0.01210	8190	

ных отложений соответствующего интервала глубин равен сумме объемов по участкам, а общий объем отложений для всего водохранилища — сумме объемов по интервалам глубин.

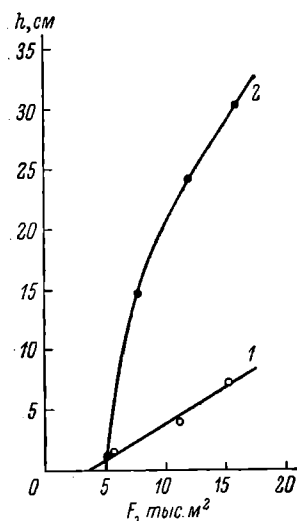


Рис. 2. Кривые связи мощности отложений (h) с площадью водного сечения (F) для Угличского водохранилища.

1 — для глубин менее 9 м;
2 — для глубин более 9 м.

При вычислении веса донных отложений сухой объемный вес в интервале глубин 0—9 м и на глубинах более 9 м определялся по соответствующим графикам распределения объемного веса по длине водохранилища (рис. 1). График для сухих объемных весов грунта на глубинах 0—9 м получен по точкам, координаты которых находились как средневзвешенное от площади соответствующего отложения, объемный вес которого определялся в поле. Для построения второго графика использовались средние значения сухого объемного веса для грунтовых колонок, отобранных в русловой части водоема.

Расчет накопления донных отложений способом кривых позволил получить детальную картину распределения объемов заиления и соответствующего им веса отложившегося грунта по длине водохранилища (табл. 3). Как и следовало ожидать, объем и вес вторичных отложений постепенно возрастают по направлению к створу Угличского гидроузла, достигая наибольшей величины перед плотиной. Значительное возрастание объемов заиления на участках водохранилища, примыкающих к его большим окраинным плесам, не нарушает общей закономерности накопления отложений, характерной для водоемов, включающих в себя русловой и долинные участки.

Результаты расчета величин осадконакопления двумя рассмотренными способами весьма близки между собой: объем донных отложений равен 0.0125 и 0.0121 км³, вес — 7870 и 8190 тыс. т (табл. 1 и 3). За окон-

чательную величину объема и веса донных отложений может быть принято среднеарифметическое значение из результатов обоих определений.

Таким образом, за период существования Угличского водохранилища (1940—1968 гг.) его наносоудерживающая способность оказалась равной 8030 тыс. т, что в пересчете на объем отложившихся взвесей составляет 0.0123 км³. Основная часть наносов, равная 3202 тыс. т (около 50% всех отложений водоема), откладывается на глубинах более 9 м, т. е. в русловом углублении водохранилища.

Интенсивность заиления водохранилища возрастает от его верховьев к створу Угличского гидроузла, достигая наибольших значений перед плотиной. Сходимость результатов расчета накопления донных отложений способом горизонтальных сечений и способом кривых позволяет использовать их для подсчета объемов заиления водохранилищ подобного типа.

ЛИТЕРАТУРА

- К у р д и н В. П. 1963. Условия формирования грунтового комплекса Угличского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 5 (8).
З и м и н о в а Н. А. и В. П. К у р д и н. 1968. Накопление донных отложений в Рыбинском водохранилище. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 18 (21).
З и м и н о в а Н. А. и В. П. К у р д и н. 1969. О величине объемного веса грунтов Рыбинского водохранилища. Метеорол. и гидрол., № 6.
-

К ОЦЕНКЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА БИТУМОИДАМИ

Оценка влияния нефтепродуктов на состояние водоемов и качество воды в них должна быть дифференцирована. Выделяют загрязнения воды легкими углеводородами бензина, керосина, лигроина и тяжелыми фракциями (битумоидами): маслами, смолами, асфальтенами. Тяжелые и легкие компоненты нефтепродуктов нередко рассматриваются самостоятельно, так как нормирование, токсикологическое действие и поведение их в водоеме различны.

В настоящем сообщении представлены результаты лабораторных опытов по определению БПК некоторых нефтепродуктов и скорости распада мазута, используемого на Конаковской ГРЭС. Полученные данные показывают, насколько различна самоочищающая способность воды по отношению к отдельным нефтепродуктам. Приводятся сведения о содержании в воде, донных отложениях, а на участке Конаково — в поверхностной пленке отдельных фракций битумоидов. Обсуждается возможное влияние некоторых гидрологических факторов на дальность распространения нефтяного загрязнения в водохранилище.

Содержание битумоидов в воде, в поверхностной пленке и донных отложениях определялось флуорометрически (Синельников, 1969а). Для качественной характеристики наиболее простых по строению ароматических соединений, сконцентрированных в поверхностной пленке, были сняты спектры флуоресценции в ультрафиолетовой области. Установка состояла из источника возбуждения СВД-120 А, газового фильтра Бекштрема с максимумом пропускания 290 нм, монохроматора ЦКБ АМН СССР с дифракционной решеткой с числом штрихов 1200 на 1 мм и ФЭУ-38 в качестве приемника ультрафиолетового излучения. Фототок усиливался электрометрическим усилителем ЛПУ-01. Спектр записывался на диаграммной ленте самописца ЭПП-09-3М. С целью определения хлорофилла «а» в донных отложениях использовалась его флуоресценция в красной области (Бейсова и др., 1969; Семенов и др., 1969). В нашей работе применялся флуорометр «Анализ-1» с приставкой для пробирок. Флуоресценция хлорофилла «а» в ацетоновом экстракте объемом 5 мл возбуждалась линией ртути 436 нм. Интенсивность красного свечения измерялась через вторичный светофильтр ОС 12+ОС 13 с максимумом пропускания 650 нм. Эталон служил хлорофилл, выделенный из фитопланктона и ацетоновой фракции донных отложений. М. П. Бейсова с соавторами (1969) показали, что калибровочные кривые, построенные из смеси пигментов, занимают промежуточное положение между предельными кривыми «хлорофилл» и «феофитин». Между интенсивностью свечения и концентрацией имелась линейная зависимость в пределах 0—0,2 мг в определяемом объеме. Одно деление шкалы флуорометра соответствовало 5 мкг хлорофилла в определении. Отбор проб воды и поверхностной пленки проводился по описанной ранее методике (Синельников, 1969а; Синельников, Михайлов, 1969). Донные отложения отбирались стратометром с диаметром трубы 40 мм. Образцы консервировались хлороформом и обрабатывались в лаборатории через 2—4 недели после отбора проб.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ РАСПАДА РАЗЛИЧНЫХ НЕФТЕПРОДУКТОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ ОПЫТАХ

Полное БПК 1 мг различных нефтепродуктов колеблется от 0.29 до 1.60 мг O_2 . По расчетным данным, 1 мг углеводов поглощает 3—4 мг O_2 . Циклические углеводороды окисляются медленнее (за 35 дней 34—52%), чем алифатические (Zo Bell, 1964).

Наши опыты проводились на воде Рыбинского водохранилища: 20—30 мг нефтепродукта вносились в склянку и капля в течение 4 час. разбивалась на мешалке, затем определялось содержание удерживаемого в воде нефтепродукта и вода разливалась в кислородные склянки. Контролем служила вода водохранилища, ее БПК₅ составляло 1.42—0.78 мг O_2 /л. Колебания в полноте окисления и постоянной скорости распада зависели от вида нефтепродуктов. Фактически окислялось 8.5—50% от внесенного нефтепродукта. Вероятно, их отдельные компоненты более стойки к биохимическому окислению. Скорость окисления легких фракций была весьма велика (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

Биохимическое потребление O_2 и постоянная скорости БПК
различных нефтепродуктов (среднее из 8 параллельных определений)
в воде канала у пос. Борок и судоходного канала

Нефтепродукт	Полное БПК 1 мг нефте- продукта, мг O_2	Постоянная скорости распада
Керосин	0.43—0.80 (0.57)	0.25—0.35
Бензин	0.69—1.90 (0.94)	0.10—0.21
Соляровое масло	0.26—0.36 (0.30)	0.10—0.20
Машинное масло	0.40—1.60 (1.10)	0.02—0.09
Моторное топливо	0.32—0.60 (0.51)	0.02—0.07
Мазут топочный	0.29—1.30 (0.98)	0.02—0.04

Сравнение постоянных скоростей распада показывает, что топочный мазут Конаковской ГРЭС распадается в 5—10 раз медленнее, чем керосин, бензин, соляровое масло. Низкой оказалась скорость распада машинного масла и моторного топлива, содержащих тяжелые компоненты нефти.

Опыты в аквариумах по определению убыли топочного мазута Конаковской ГРЭС в испытуемой воде за определенный промежуток времени имели целью выявить фактическую скорость его распада и некоторые изменения люминесцентных свойств, связанных со степенью трансформированности. Для этого вода в количестве 4 л помещалась в 5-литровые стеклянные банки и тотчас после добавления нефтепродуктов перемешивалась сильным встряхиванием в течение 10 мин. После отстаивания в течение дня она переливалась сифоном в аквариум, где определялось содержание битумоидов в начале опыта и на последующих стадиях. Обнаружилось, что мазут, выпавший из воды, в течение 3—4 недель изменял цвет и интенсивность свечения. Цвет свечения менялся от желтого к коричнево-черному, а фракции масел, светившиеся голубым цветом, в конце опыта обнаружили в воде в незначительном количестве. Интенсивность флуоресценции 1 мг мазута в начале опыта составляла 115—125 ед. по шкале «Анализ-1», а через 21 день — 64—82 ед.

Ранее аналогичное явление изменения цвета и интенсивности свечения под действием окисляющих факторов описал Т. И. Фазилов (1965а).

19656). Автор показал, что в процессе окисления меняется компонентный состав битумоидов. Содержание масел уменьшается, а количество асфальтенов увеличивается. Этим объясняется изменение цвета люминесценции мазута от светло-желтого до темно-коричневого и черного. Фракции мазута с измененными люминесцентными свойствами выделялись нами не из воды, а из осадка, который выпал на дно через 5—7 дней после начала опыта. В дальнейшем на темном осадке окисленного мазута интенсивно развивались водоросли, которые, вероятно, совместно с бактериями завершали процесс окисления. Всплытия нефтяных остатков со дна аквариумов, в которых длительность опыта составляла более 2 месяцев, не отмечалось.

Т а б л и ц а 2

Скорость распада мазута в опытных аквариумах, мг/л

Номер сосуда	9 VII	11 VII	16 VII	21 VII	Примечание
1	9.0	2.0	0.6	0.6	} Экспозиция на свету
2	9.0	2.0	0.4	0.4	
3	9.0	2.0	0.4	0.4	
4	9.0	1.8	0.6	0.6	
5	9.0	2.5	0.6	0.6	} Экспозиция в темноте
6	9.0	1.5	0.3	0.15	
Контроль ...	0.2	0.1	0.08	0.008	Подогрев до 30°

Опыты по определению скорости распада, выполненные в июле 1969 г., дали следующие результаты (табл. 2). В течение первых суток после тщательного взбалтывания происходило распределение мазута между водой и ее поверхностью. Вследствие этого содержание мазута в воде уменьшалось с 9 до 2 мг/л. В последующие 10 дней при температуре воды 20—24° и освещенности 500—1200 лк ежедневно распадалось около 0.16 мг нефтепродукта. Выяснилось, что снижение концентрации мазута в воде связано не только с его распадом, но и с перераспределением в аквариумах. Трансформированные продукты мазута постепенно концентрировались на дне.

Содержание битумоидов, осевших на дне аквариумов, составляло 27—50.3% от внесенного количества. На поверхности воды оставалось 2.6—3.2 мг, или 9.6—10.8% от всего количества. К 21 июля в сосуде оказалось 10.8—17.4 мг. За 12 дней распалось от 35 до 60% мазута. Ежедневно в аквариумах распадалось 0.8—1.3 мг мазута, или 0.26—0.43 мг/л. Опыты Г. Л. Марголиной (1969) показали, что в воде верхневолжских водохранилищ ежедневно может распадаться 1.1—2.95 мг/л солярового масла. Фактическая скорость распада мазута с учетом его содержания на поверхности и на дне ниже, чем более легких фракций нефтепродуктов. При оценке скорости распада нефтепродуктов ввиду их плохой растворимости в воде необходимо учитывать особенность их распределения между дном, поверхностью, стенками сосуда и собственно массой воды.

Найденные в опыте величины скорости распада неоднозначны с величинами распада битумоидов в водоеме. Они дают ориентировочное представление об особенностях и начальных процессах распада тяжелых фракций.

**ЗАГРЯЗНЕНИЕ БИТУМОИДАМИ ВОДЫ ВОДОХРАНИЛИЩА
У Г. КАЛИНИНА**

Промышленность и городские стоки г. Калинина служат постоянным источником загрязнения Волги нефтепродуктами (табл. 3). Определения битумоидов в сточных водах были осуществлены в августе 1964 г. и мае 1968 и 1970 гг. Расход битумоидов, поступающих в реку через общегородской сток, на протяжении 6 лет находится в пределах одного порядка.

Т а б л и ц а 3
Содержание битумоидов в общегородском стоке г. Калинина

Дата	Объем сточных вод, тыс. м ³ /сутки	Концентрация битумоидов, мг/л	Расход битумоидов, кг
26 VIII 1964	145	3.1	449.5
22 V 1968	200	4.4	880.0
18 V 1970	220	2.6	572.0

В 1964 г. основной общегородской сток после механической очистки поступал в Волгу через ручей Перемерки. Часть городских стоков западной части города смешивалась с промышленными стоками хлопчатобумажного комбината и прошедшими механическую очистку кубовыми остатками медно-аммиачной обработки целлюлозы и поступала в Волгу через р. Тьмаку. Объем этих промышленных стоков составлял 7200 м³/сутки, а сток в Волгу достигал 25 000 м³/сутки. Содержание битумоидов в стоке, поступающем

Т а б л и ц а 4
Содержание битумоидов в воде Волги у г. Калинина в августе 1964 г.
(поверхностные пробы по судовому ходу), мг/л

Место отбора проб	Расстояние от г. Калинина, км	Нефильтрованная вода	Фильтрованная вода (мембранный фильтр № 4)	Цвет флуоресценции зон капиллярного поднятия
Выше г. Калинина (Мигалово)	0	0.15	0.10	{ 1-я — желтая 2-я — голубая
Ниже г. Калинина (нефтебаза)	7	2.30	0.80	{ 1-я — коричневая 2-я — оранжевая 3-я — белая
Дер. Горохово	11	1.65	0.60	{ 1-я — коричневая 2-я — оранжевая 3-я — голубая
Дер. Оршино	17	2.0	1.65	{ 1-я — оранжевая 2-я — голубая
Дер. Заборовье	20	1.25	0.80	{ 1-я — желтая 2-я — голубая
Пос. Алексино	23	0.60	0.25	{ 1-я — желтая 2-я — голубая
Выше впадения р. Шоши	57	0.40	0.15	1-я — голубая
Выше плотины	105	0.35	0.15	1-я — голубая

в р. Тьмаку, оказалось выше (5.7 мг/л), чем в ручье Перемерки (3.1 мг/л). Дополнительно через р. Тьмаку в Волгу поступало около 142 кг тяжелых фракций нефти. Выделенные в зонах капиллярного поднятия они имели на бумаге ярко-желтую и зеленую люминесценцию. Кроме того, замечено наличие красителей, выделенных в зоне капиллярного поднятия из воды р. Тьмаки. Таким образом, в 1964 г. из двух главных выпусков города в Волгу поступил 591 кг тяжелых нефтяных остатков.

На основе выполненных в это же время определений битумоидов в воде Волги был рассчитан расход битумоидов вблизи пункта полного смешения стоков г. Калинина с волжскими водами, который находится в 35 км от города, у дер. Городня. В наших определениях у пос. Алексино (23 км) концентрация битумоидов составляла 0.60 мг/л (табл. 4). При расходе воды Волги в это время, равном 38.7 м³/сек., и за вычетом фоновое содержание битумоидов (0.15 мг/л — определение у пос. Мигалово) расход битумоидов составил 1403.7 кг. Таким образом, в Волгу дополнительно могло поступать 812 кг нефтепродуктов в сутки за счет судоходства, поверхностного стока и 20 небольших производственных выпусков в черте города.¹

Т а б л и ц а 5

Содержание битумоидов в воде Иваньковского водохранилища
(рейс 12—22 мая 1970 г.), мг/л

Место отбора проб	Станции	Легкие фракции	Средние фракции	Сумма
Пос. Мигалово	Русло	0.33	0.15	0.48
Г. Калинин	»	1.99	0.48	2.47
У ручья Перемерки	Левый берег	0.09	0.52	0.61
Дер. Горохово	Русло	0.13	0.62	0.75
	Правый берег	0.49	0.16	0.65
	Левый берег	0.10	0.48	0.58
Пос. Алексино	Русло	0.05	0.94	0.99
	Правый берег	0.48	0.52	1.00
	Левый берег	0.25	0.61	0.76
Дер. Городня	Русло	0.18	1.12	1.30
	Правый берег	0.18	0.76	0.94
	Левый берег	0.36	0.12	0.48
Мошковичский залив:				
разрез 5	Русло	0.94	0.18	1.12
	Правый берег	0.62	0.06	0.68
разрез 8	Пойма	0.52	0.06	0.58
устье	Русло	0.62	0.19	0.81
Дер. Корчева	»	0.52	0.20	0.72
Выше Иваньковской плотины	»	0.52	0.03	0.55
Выше Угличской плотины	»	0.26	0.01	0.27
Рыбинское водохранилище (пос. Коприно)	»	0.19	0.015	0.20

Как видно из табл. 4, непосредственно у города содержание битумоидов было в 4 раза выше, чем вблизи пункта полного смешения. Последующие определения (май 1970 г.) показали неравномерность распределения битумоидов в воде по разрезу ниже города (табл. 5). Локальные пункты загрязнения битумоидами выделялись по характерному цвету люминесценции в зонах капиллярного поднятия. В данном случае оранжевая люминесценция была

¹ Стоки, поступающие в р. Тьмаку, в настоящее время подключены к общегородской канализации.

связана с моторным топливом, слитым с баржи, стоявшей под выгрузкой ниже 2-й городской больницы. Этот участок до Березовой Рощи имел наибольшие признаки видимого загрязнения реки нефтепродуктами. Загрязненность поверхности составляла у правого берега 3—4 балла. Пленка содержала большое количество крупных и мелких включений. Проба с растеканием капли нефтепродукта по поверхности воды (Драчев, 1948, 1951) позволила обнаружить присутствие значительных концентраций поверхностно-активных веществ: диаметр растекания капли составлял 0.25—0.40 м. Такая небольшая растекаемость капли свидетельствует, по С. М. Драчеву, о значительном загрязнении поверхности водоема.

Содержание битумоидов в образцах вод Иваньковского водохранилища, отобранных в рейсе 12—22 мая 1970 г., выше, чем в воде Угличского и Рыбинского (у сел. Коприно) водохранилищ (табл. 5). Значения, полученные для Волжского плеса Рыбинского водохранилища в 1964 г., были в 4 раза ниже, чем в 1970 г., а в 1966 г. они были близки к концентрациям 1970 г. (Синельников, 1969б).

Концентрация битумоидов у пос. Мигалово в 1970 г. по сравнению с 1964 г. возросла в 4 раза. Загрязнение Волги ниже г. Калинина осталось на том же уровне. На участке загрязнения Горохово—Алексино битумоиды распространяются вдоль правого берега и русла. На этом участке наблюдались более высокие содержания (до 50—85% от общей суммы) средних, смолистых битумоидов по сравнению с легкими фракциями, которые преобладают в чистой воде. Битумоиды участка загрязнения более окрашены, свечение их имеет светло-коричневатый или оранжеватый оттенок в отличие от смолистых битумоидов приплотинного участка. Природные битумоиды вод при дневном освещении имеют слабую окрашенность и люминесцируют бледно-желтым или голубым цветом. Эти оптические свойства битумоидов могут быть использованы при выделении участков различной степени загрязнения.

Исходя из ориентировочной (полученной в лабораторных опытах) скорости распада мазута 0.3 мг/л в сутки при его концентрации вблизи г. Калинина 0.7—1.5 мг/л, можно полагать, что для удаления из воды тяжелых фракций необходимо не более 3—5 суток. Но дальность распространения нефтяного загрязнения будет зависеть от температуры и от скорости течения обследуемого участка реки. В Иваньковском водохранилище значительная проточность отмечена только на Волжском плесе (до 0.1—0.15 м/сек.). На Шошинском плесе скорость течения снижается до 0.05—0.06 м/сек. (Буторин, 1969). В связи с этим можно ожидать, что загрязнение водной массы смолами и асфальтенами, связанное со стоками г. Калинина, в летний период не распространяется далее Алексина—Городни. Другие крупные выпуски промышленных сточных вод на участке от Калинина до Конаково отсутствуют.

Неожиданно высокие концентрации смолистых битумоидов у Алексина и Городни мы относим к загрязнениям, связанным с судоходством и поверхностным стоком.

К ОЦЕНКЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА У Г. КОНАКОВО

На Конаковской ГРЭС в качестве основного источника топлива применяют топочный мазут, который попадает в подогретые воды, образующиеся в результате использования волжской воды для охлаждения отработавшего пара. Температура кипения мазута 300—350°. Большой процент в нем составляют высококипящие масла и до 10% — смолы и асфальтены.

Загрязнение нефтепродуктами может оказаться наиболее значительным фактором, который определяет влияние сбросных вод Конаковской ГРЭС на водоем.

Объектом исследования служили образцы из сбросного канала протяженностью 3 км, Мошковичского залива (3 км) и участка Иваньковского водохранилища, на котором обнаружены изменения термического режима, связанные с теплыми водами (Буторин, 1969). Данные о содержании битумоидов в канале ГРЭС и Мошковичском заливе представлены в табл. 6.

Таблица 6

Содержание битумоидов в отводном канале ГРЭС и Мошковичском заливе (апрель 1969 г.), мг

Место отбора проб	В поверхностной пленке на 1 м ²	В воде на 1 л	1 м ³ воды 1 м ² поверхностной пленки
Водозабор ГРЭС	—	0.6—1.4	—
Между 1-й и 2-й нефтеловушками	200	3.3	11.5
Между 2-й и 3-й нефтеловушками	55	1.1—1.9	20—34.5
100—300 м ниже нефтеловушек	55	1.7	30.9
700—1600 м ниже нефтеловушек	120—173	—	—
Мошковичский залив:			
3-я станция	55	1.3—2.0	23.6—36.2
4-я станция	57	2.2—2.7	38.5—47.5
5-я станция	50	1.3	26.0
устье залива (8-й разрез)	68	2.7	39.7
выход из залива (300 м от правого берега)	Менее 20	0.8—2.2	40—110 и более
Водохранилище у дер. Корчевы	Менее 20	0.5	Более 25

Высокая концентрация битумоидов у водозабора ГРЭС (1.4 мг/л) объясняется тем, что нефтяное хозяйство периодически сбрасывало через канаву свои стоки непосредственно в Волгу. Обследование в апреле 1969 г. как раз совпало с пуско-наладочными работами ГРЭС. В одном из образцов, взятых в это время, концентрация битумоидов достигала

Таблица 7

Содержание битумоидов в воде Иваньковского водохранилища у г. Конаково (5—15 апреля 1970 г.), мг/л

Номер образца	Разрез, станция	Глубина, м	Легкие фракции	Тяжелые фракции	Сумма
1	Волга, разрез 1, ст. 3	10.5	0.07	0.01	0.08
2	1-й водозабор ГРЭС	6.5	0.60	0.04	0.64
3	2-й водозабор ГРЭС	6.5	0.14	0.14	0.28
	Волга, разрез 3:				
4	ст. 6	3.0	0.08	0.16	0.24
5	ст. 7	8.0	0.04	0.08	0.12
6	ст. 8, русло	13.0	0.07	0.26	0.33
7	Сбросный канал ГРЭС, ст. 1	3.5	0.40	0.72	1.12
	Мошковичский залив:				
8	ст. 3	4.5	0.42	0.60	1.02
9	ст. 4	4.0	0.26	0.26	0.52
10	ст. 5	4.0	0.07	0.24	0.31
	Волга:				
11	разрез 8	3.5	0.09	0.30	0.39
12	разрез 9, ст. 4	3.0	0.18	0.08	0.26
13	Дер. Корчева, разрез 4, ст. 4	6.0	0.18	0.17	0.35

Содержание битумоидов в воде Ивановского водохранилища у г. Конаково
(5—15 мая 1970 г.), мг/л

Номер образца	Разрез, станция	Глубина, м	Легкие фракции	Тяжелые фракции	Сумма
1	Дер. Карачарово	13.0	0.32	0.08	0.40
	Мошковицкий залив:				
2	ст. 3	5.0	0.35	0.24	0.59
3	ст. 5	5.5	0.07	0.24	0.31
	Разрез 9, ст. 4:				
4	поверхность	6.0	0.30	0.12	0.42
5	дно	6.0	0.18	0.06	0.24
	Разрез 3, ст. 7:				
6	поверхность	4.0	0.10	0.08	0.18
7	дно	4.0	1.20	0.62	1.82
	Разрез 4, русло:				
8	поверхность	15.5	0.07	0.12	0.19
9	дно	15.5	0.09	0.12	0.21
10	Разрез 4, ст. 2	7.0	0.16	0.20	0.36

8.9 мг/л. В образцах, отобранных весной 1970 г., содержание тяжелых фракций оказалось в 2—4 раза ниже (табл. 7 и 8). В этот период в Мошковицкий залив поступало 1.6—3.3 т мазута. Учитывая высокие значения концентрации битумоидов в воде в апреле 1969 г., можно полагать, что в отдельные периоды с подогретыми водами поступало до 3.9 т мазута.

До начала весеннего половодья, когда дно Мошковицкого залива обнажено, нефтепродукты транспортируются потоком теплых вод до зоны подпора (разрезы 8 и 9). Их содержание на всем протяжении ручья составляет 0.3—0.7 мг/л, но в отдельные периоды бывает довольно высоким (1.1—2.7 мг/л). Во время весеннего половодья после заполнения залива условия передвижения тяжелых фракций значительно меняются. Концентрация битумоидов в воде устья залива по сравнению со сбросным каналом падает в 3 раза (табл. 7). Это связано с изменениями скоростей течения в заливе, а стало быть, и с изменениями условий седиментации.

В верхнем слое подогретых вод содержание битумоидов почти в 2 раза выше, чем в нижних слоях с более низкой температурой, которые из водохранилища поступают в Мошковицкий залив (Буторин и Курдина, 1971).

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ СБРОСНОГО КАНАЛА И МОШКОВИЦКОГО ЗАЛИВА

Загрязнение поверхности воды в канале отмечено на всем его протяжении. Результаты пробы с растеканием капли мазута, характеризующей, по С. М. Драчеву (1948, 1951), загрязненность водной поверхности, показывают, что поверхность воды в начальной части канала значительно загрязнена (табл. 9), а в конечной части загрязненность в 4—6 раз ниже. Поверхность водохранилища в русловой части и у правого берега у дер. Корчевы имела признаки загрязнения, хотя видимой поверхностной пленки не обнаружено. Время растекания капли мазута значительно больше, чем на чистой поверхности Рыбинского водохранилища.

Площадь загрязнения участка поверхности непосредственно перед 1-й и 2-й нефтеловушками в апреле 1969 г. составляла 75—120 м². Видимая поверхностная пленка покрыла сплошным слоем прибрежные участки шириной 1.5—2.5 м, вдоль всего берега канала. Загрязненная поверхность

Таблица 9

Характеристика загрязнения поверхности воды, оцененная по степени растекания капли мазута (среднее из трех определений)

Дата	Место отбора проб	Ширина растекания капли, см	Длительность нахождения капли на поверхности воды, мин.	Примечание
	Рыбинское водохранилище:			
24 VI 1968	Зеленый остров	140	0.2	Видимое загрязнение поверхности отсутствует
25 VI 1968	Хохотский остров	130	0.1	
29 VI 1968	»	140	0.25	
6 VII 1969	Шуморовский остров	50	40.0	Поверхность покрыта сплошной пленкой
7 VII 1969	То же	30	90.0	
3 V 1969	Сбросный канал Конаковской ГРЭС у моста	20	150.0	Загрязнение поверхности 3—4 балла
5 V 1969	Там же	15	Более 180	
4 V 1969	Сбросный канал ГРЭС, напротив станции биологической очистки	80	Более 30	Видимая пленка изредка
6 V 1969	Там же	110	Более 30	
6 V 1969	Иваньковское водохранилище	130	10	Видимое загрязнение поверхности отсутствует
		110		
6 V 1969	У дер. Корчевы		7	

Таблица 10

Характеристика поверхностной пленки, собранной в отводящем канале Конаковской ГРЭС (май 1969)

Номер образца	Место отбора образца	Содержание нефтепродуктов, мг/50 мл CHCl_3	Качественный состав по данным люминесцентно-битумологического анализа	Примечание
1	Поверхностная пленка, собранная в отводящем канале	10.0	Жировые и маслянистые вещества	Скопление пленки у берегов в водорослях
2	Поверхностная пленка, собранная в отводящем канале	10	То же	Скопление пленки между улавливающими трубами
3	Хлороформный экстракт из воды отводящего канала	3.2	Смолистые битумоиды	Скопление пленки у берега
4	Поверхностная пленка в 100 м ниже очистных сооружений	2.5	Жировые и маслянистые вещества	Видимые скопления пленки отсутствуют
5	Поверхностная пленка в конце канала	2.5	То же	То же
6	Контроль воды и хлороформа для экстракта	0.0	—	—

канала составляла 16 000 м². Содержание нефтепродуктов у берегов и у нефтеловушек равнялось 200 мг/м², а в двух образцах — 275—300 мг/м². На прибрежной поверхности (без участков свободно плывущей нефти) в период обследования содержалось до 6—8 кг битумоидов, состоящих в основном из легких фракций. Их интенсивная флуоресценция в области 300—450 нм свидетельствовала о том, что они содержат ароматические соединения с 1—3 ядрами.

Для спектрального люминесцентного анализа было приготовлено 5 образцов хлороформных экстрактов из поверхностной пленки. Содержание нефтепродуктов в поверхностной пленке и характеристика веществ, растворимых в хлороформе, приведены в табл. 10. Спектр флуоресценции этих веществ в ультрафиолетовой области имел выраженную структуру с несколькими максимумами: 350, 375, 395 и 410 нм (рис. 1). Первые 2 максимума совпадают со спектрами, приведенными С. А. Паркером (Parker, 1968) для легких ароматических соединений, которые содержатся в нефтепродуктах. Флуоресценция в этой области спектра характерна для соединений углеводородов с 2 ядрами. Именно этот тип ароматики, по Х. И. Мамедову (1958), наиболее характерен для нефтяных масел. При температуре жидкого азота органические вещества, экстрагированные из пленки хлороформом, флуоресцировали зеленым или светло-зеленым цветом, характерным для поликонденсированных ароматических углеводородов. Таким образом, было выяснено, что в пленке, образующейся на поверхности сбросного канала и Мошкovichского залива, концентрируются ароматические углеводороды различной степени конденсированности. Содержание ароматической фракции в поверхностной пленке связано с общим количеством нефтепродуктов в ней (табл. 10).

Уже в первое время после поступления мазута в канал происходит частичное распределение его по фракциям. Хлороформрастворимые вещества поверхностной пленки содержат исключительно маслянистые фракции. В битумоидах, извлеченных из воды, преобладают смолистые вещества.

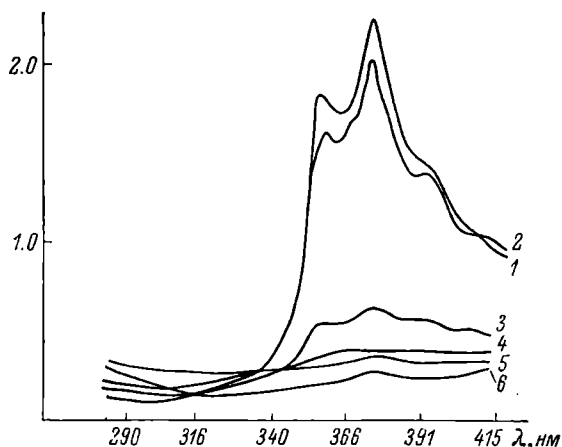


Рис. 1. Спектры флуоресценции в ультрафиолетовой области хлороформных экстрактов из поверхностной пленки. Характеристика образцов представлена в табл. 10.

По оси ординат — интенсивность флуоресценции в относительных единицах шкалы диаграммной ленты, по оси абсцисс — длина волн, нм.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ БИТУМОИДОВ, СОДЕРЖАЩИХСЯ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Распределение донных отложений в водохранилище определяется гидродинамической активностью отдельных его участков. При отборе образцов мы руководствовались схемой их распределения, предложенной В. П. Курдиным (1961). На пойменных участках Волжского плеса донные отложения представляли собой первичные грунты — супесчаные почвы. На участке русла Калинин—Алексино были отобраны вторичные трансформированные грунты — песок и илистый песок. Отбор этих образцов стратометром был затруднен.

Вследствие высокой проточности указанного участка содержание органических веществ в донных отложениях было низким. Донные отложения Волжского плеса оказались малопригодными для оценки характеристики условий загрязнения водоема нефтепродуктами.

Донные отложения Шопинского и Ивановского плесов представляли собой песчанистый серый, серый и черный илы с более высоким содержанием суммарного и хлороформрастворимого органического вещества.

Т а б л и ц а 11

Характеристика легких битумоидов из илов Ивановского плеса
(отбор образцов 8—9 мая 1968 г.)

Место отбора образцов	Потеря при прокаливании, %	Зеленые пигменты в пересчете на хлорофилл «а»	Масла и углеводороды (циклогексановая фракция)	Легкие (спирто-растворимые смолы)	Сумма легких битумоидов
Дер. Зборье, разрез 2 . .	6.6	0.065	0.15	0.30	0.45
Ст. Широкая Протока, разрез 3	9.4	0.012	0.02	0.21	0.23
Напротив Мошковичского залива, разрез 4 . . .	5.8	0.005	0.10	0.28	0.38
Дер. Корчева, разрез 4:					
русло	11.6	0.035	0.45	0.26	0.71
левый склон	5.3	0.020	0.040	0.145	0.185
Мошковичский залив, ст. 4	7.6	0.000	0.005	0.06	0.065
Проточная часть залива . .	11.2	0.020	0.18	0.13	0.31
8 км от Ивановской плотины	14.4	0.120	0.30	0.52	0.82

Первые образцы ила для определения битумоидов были отобраны в мае 1968 г. дночерпателем Петерсена, а экстрагирование битумоидов было проведено смесью этилового спирта и петролейного эфира. Таким образом, извлекались пигменты и более легкие фракции битумоидов: ароматические углеводороды, масла и легкие смолы (табл. 11). Дополнительное разделение на фракции производилось на полоске хроматографической бумаги: циклогексановая фракция, не окрашенная при дневном освещении, флуоресцировавшая синим и голубым цветом, представляет собой масла и углеводороды; окрашенные при дневном освещении легкие битумоиды, имевшие светло-желтый цвет флуоресценции, представляют собой фракцию смол, а ацетоновая фракция, светившаяся красным цветом, — пигменты. В зоне капиллярного поднятия были выделены 2 пигментные фракции: люминесцирующие красным цветом хлорофиллы и люминесцировавшие желтым цветом каротиноиды и флавоновые пигменты. На рис. 2 показаны спектры флуоресценции смеси пигментов, содержащихся в ацетоновой фракции, зарегистрированные на спектрографе ИСП-51 с фотоэлектрической приставкой ФЭП-1.

В спектре можно выделить широкую полосу в области 478—540 нм с диффузным максимумом в области 503 нм. Следующая полоса излучения располагается в области 570 нм. Зелено-желто-оранжевая область флуоресценции 503—570 нм связана со свечением каротиноидов и флавоноидов. Свечение хлорофилла «а» выделяется в спектре отдельной полосой с максимумом в области 650 нм. Этот максимум может быть использован для количественного определения хлорофилла «а» с помощью спектрографа. При этом необходимо иметь в виду тушащее влияние соединений, флуоресцирующих в области 503—570 нм.

По Ф. М. Свейну и Г. Вентерису (1967), флуоресцирующие пигменты, выделенные из озерных осадков, относятся к флавоноидам и флавопротеинам, индоловым кислотам. Авторы считают, что флавоноиды могут образовываться в результате бактериального окисления аккумулярованного органического вещества и служат указателем биологической активности в накапливающихся осадках. Косвенно относительное содержание желтых пигментов было учтено по интенсивности свечения в области 570 нм, которая выделялась вторичным светофильтром ЖС-18 (измерения на флуорометре «Анализ-1»). Интенсивность желтой флуоресценции ацетонового

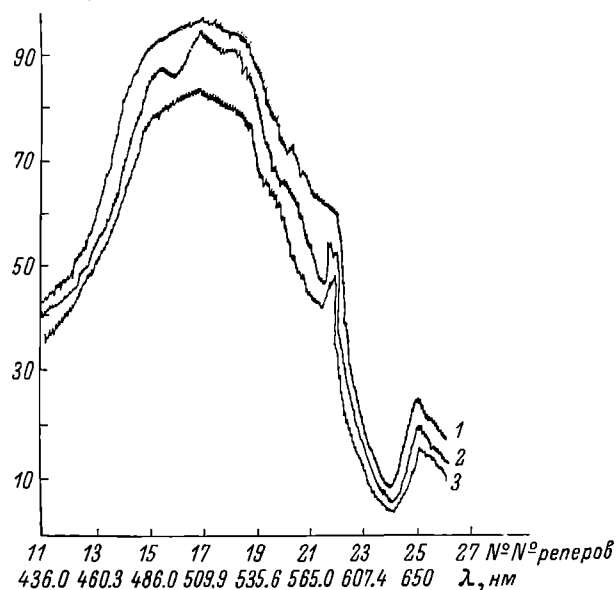


Рис. 2. Спектры флуоресценции ацетоновой фракции хлороформных экстрактов из илов Иваньковского водохранилища.

1 — устье Мошковичского залива; 2 — водохранилище (разрез 9); 3 — водохранилище (дер. Корчева). По оси ординат — интенсивность флуоресценции в относительных единицах шкалы диаграммной ленты, по оси абсцисс — номера реперов спектрографа ИСП-51 и соответствующая им длина волн, нм.

экстракта из илов Иваньковского плеса равнялась 98—140 ед. флуорометра, из илов Шопинского плеса — 49—84 и Волжского — 27—80 ед.

Содержание хлорофилла (табл. 12 и 13) в донных осадках Волжского плеса невелико (5.0—14.8 мкг/г). Оно значительно возрастает в зоне седиментации (9.18—59.9 мкг/г). Особенно высоко содержание хлорофилла на участке водохранилища ниже поступления теплых вод и в приплотинной части. По данным наблюдений, в мае 1970 г. концентрация хлорофилла в иле составляла 184.5—211.9 мкг/г, а в образцах, отобранных в зоне влияния теплых вод (дер. Корчева), она оказалась в 2 раза выше.

Содержание наиболее легких битумоидов по отношению к общему органическому веществу составляло 0.25—0.70% (табл. 11). Последующие исследования показали (табл. 12), что суммарное содержание битумоидов по отношению к общему органическому веществу составляет на загрязненных участках 2.0—3.0%.

Результаты анализов донных отложений Иваньковского водохранилища и Мошковичского залива, представленные в табл. 12 и 13, свидетельствуют о возможности миграции битумоидов с осадками, накапливающимися в зоне седиментации. На возможную связь тяжелых нефтяных фракций

Таблица 12

Содержание битумоидов в донных отложениях Ивановского водохранилища
(рейс 12—22 мая 1970 г.), мг/г сухого ила

Станция	Характер отложений	Потеря при прокаливании, %	Спирто-бензольная фракция	Хлороформная фракция	Сумма	Хлорофилл, мкг/г
Пос. Мигалово, русло	Песок	0.28	0.52	0.08	0.60	5.0
Р. Тверца, устье	»	0.48	0.64	0.05	0.69	8.4
Ручей Перемерки, у городского стока	Черный ил (запах сероводорода)	14.0	7.20	1.50	8.70	0.0
Пос. Перемерки, русло выше стока	Глина с песком	3.88	0.69	0.06	0.75	12.2
Дер. Оршино, устье	Песок, глина	1.80	0.75	0.04	0.79	8.7
Дер. Горохово: левый берег	Супесь	2.27	0.45	0.07	0.52	11.2
русло	Песок, глина	2.61	0.32	0.02	0.34	5.6
правый берег	Супесь	2.50	0.42	0.06	0.48	9.4
Пос. Алексин: левый берег	Супесь с илом	14.10	2.28	0.16	2.34	12.7
русло	Песок	1.90	0.60	0.07	0.67	6.2
правый берег	Глина красная	4.95	1.20	1.15	1.35	14.8
Дер. Городня: левый берег	Песчаный ил	3.29	0.84	0.10	0.94	37.6
русло	Глина красная	4.60	1.62	0.06	1.68	9.18
правый берег	То же	3.86	0.65	0.10	0.75	13.2
Шошинский плес	Черный ил	13.05	3.30	0.25	3.55	59.9
Водосброс ГРЭС, у г. Конаково	Глина	7.8	1.65	0.30	1.95	32.4
Мошковичский залив, разрез 5: левый берег	Серый ил	9.3	2.76	0.64	3.14	120.8
русло	Торфянистый ил	39.1	8.32	1.12	9.46	140.7
правый берег	Серый ил	5.03	1.25	0.40	0.65	78.4
Мошковичский залив, устье: левый берег	Песок, глина	1.14	0.69	0.08	0.77	63.4
русло	Глина с наилком	6.4	1.10	0.06	1.16	31.9
правый берег	Серый ил	9.23	3.40	0.19	3.59	110.0
Дер. Корчева, русло	» »	11.9	3.25	0.32	3.57	211.9
5 км от плотины	» »	9.5	2.11	0.22	2.33	184.5
Г. Углич	» »	8.6	1.95	0.06	2.01	67.3
Сел. Коприно	Черный ил	12.7	2.15	0.10	2.25	56.9

Таблица 13

Содержание битумоидов в илах отводного канала и Мошковичского залива
(апрель, 1969 г.)

Место отбора проб	Хлорофилл «а», мкг/г	Содержание битумоидов				Характер донных отложений
		мг/м ² влажного ила	мг/г сухого ила	мг/мл воды	ил вода	
Между 1-й и 2-й нефтеловушками . . .	9.7	9.13	0.65	0.003	216	Песок, глина
Между 2-й и 3-й нефтеловушками . . .	216	13.0	0.65	0.001	650	» »
3-я станция	38.4	49.1	2.62	0.001	2620	Серый ил
4-я станция	11.3	65.0	0.16	0.002	80	Песок, глина
5-я станция	52.7	65.0	0.26	0.001	260	Песок с наилком
Устье Мошковичского залива	196.3	56.0	0.90	0.002	450	То же

Место отбора проб	Хлоро- филл «а» мкг/г,	Содержание битумоидов				Характер донных отложений
		мг/м ² влажного ила	мг/г сухого ила	мг/мл воды	ил вода	
Пойма правого берега Мошковичского залива	237.4	2700.0	10.8	0.013	830	Черный, тор- фянистый ил
Волга, русло, разрез 9а	418.2	650.0	2.6	0.001	2600	Черный ил
Волга у дер. Корчевы, правый берег . . .	362.7	637.0	1.7	0.0005	3400	» »

с взвешенными частицами указывают данные, полученные автором в 1964 г. в фильтрованной и нефилтрованной воде (Синельников, 1969б). Содержание битумоидов в донных отложениях Волжского плеса на участке Калинин—Горохово было невелико (0.34—0.75 мг/г сухого ила). На участке же выпуска стока г. Калинина концентрация битумоидов оказалась в 10 раз выше, чем во вторичных грунтах Волги. Площадь участка загрязнения была невелика. Только здесь обнаружены тяжелые смолисто-асфальтеновые фракции битумоидов. На участке высокой проточности Волжского плеса, в образцах пойменной части реки, получены более высокие значения содержания битумоидов, чем в образцах русловой. Повышенное содержание битумоидов отмечено в донных отложениях Мошковичского залива.

На дне сбросного канала и ручья в слое толщиной 2—4 см содержание битумоидов колебалось от 0.65 до 10.8 мг/л, или от 6.0 до 65 г/м², на пойменных участках залива — от 637 до 2700 г/м². Отношение содержания битумоидов в донных отложениях и воде составляло 830—2620, что свидетельствует о высокой концентрации битумоидов донных отложений на дне участков, находящихся в зоне подпора. В донных отложениях сбросного канала обнаружено небольшое количество хлорофилла «а» и продуктов его распада (9.7—21.6 мкг/г). В проточном ручье Мошковичского залива содержание хлорофилла «а» несколько выше (11.3—52.7 мкг/г), а в зоне седиментации довольно значительно (237.4—196.3 мкг/л).

Обнаружение значительного количества хлорофилла вне периода вегетации связано, вероятно, с влиянием теплых вод. Небольшое процентное содержание битумоидной части органики по отношению к общему органическому веществу в большей части образцов показывает, что процессы самоочищения проходят достаточно интенсивно. На основе проведенного исследования условий загрязнения воды Иваньковского водохранилища тяжелыми фракциями можно сделать вывод, что оно носит ограниченный характер. Только в отдельные периоды загрязнение воды нефтяными остатками может распространяться на расстояния свыше 30—40 км. Большое значение имеет накопление и распределение битумоидов в донных отложениях. В целом в осадках Иваньковского водохранилища значительного накопления тяжелых фракций нефти не происходит.

ЛИТЕРАТУРА

- Бейсова М. П., А. Д. Семенов, Л. Н. Лопатина. 1969. К люминесцентному определению хлорофилла и феофитина в фитопланктоне. Гидрохим. матер., т. 51.
- Б у т о р и н Н. В. 1969. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада. Изд. «Наука», Л.

- Б у т о р и н Н. В. и Т. Н. К у р д и н а. 1971. Новые данные о характере переноса вод в Иваньковском водохранилище. Информ. бюлл. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, № 8.
- Д р а ч е в С. М. 1948. Учет загрязнения канала им. Москвы нефтью от судов с механическими двигателями. В кн.: Загрязнение и самоочищение водоемов, вып. 1. М.
- Д р а ч е в С. М. 1951. Клязьминское водохранилище как источник питьевого водоснабжения. В кн.: Санитарная характеристика водоемов. Изд. Акад. мед. наук СССР, М.
- К у р д и н В. П. 1961. Грунты Иваньковского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 4 (7).
- М а м е д о в Х. И. 1958. Люминесцентно-спектрографический метод исследования нефтяных фракций. Автореф. канд. дисс. М.
- М а р г о л и н а Г. Л. 1969. Интенсивность процессов бактериального разрушения органических веществ в водохранилищах. Автореф. канд. дисс. М.
- С в е й н Ф. М., Г. В е н т е р и с. 1967. Распределение флавоноидов и некоторых других гетероциклических соединений в озерных осадках. В кн.: Органическая геохимия. М.
- С е м е н о в А. Д., М. П. Б е й с о в а, Л. Н. Л о п а т и н а. 1969. Некоторые вопросы исследования растительных пигментов в водоеме. Гидрохим. матер., т. 49.
- С и н е л ь н и к о в В. Е. 1969а. Методика определения битумоидов в открытых водоемах. Гидрохим. матер., т. 50.
- С и н е л ь н и к о в В. Е. 1969б. Содержание битумоидов в зарегулированных водоемах как показатель загрязнения их нефтепродуктами. Гидрохим. матер., т. 50.
- С и н е л ь н и к о в В. Е., В. А. М и х а й л о в. 1969. Опыт количественного учета загрязнения поверхности водоемов битумоидами. Гидробиол. журн., т. 5, № 1.
- Ф а з и л о в Т. И. 1965а. Исследование битума люминесцентной микроскопией. Химия и технология топлив и масел, № 2.
- Ф а з и л о в Т. И. 1965б. Экспресс-метод контроля процесса окисления битума методом люминесцентного анализа. Химия и технология топлив и масел, № 2.
- Р а k e r С. А. 1968. Photoluminescence of solutions with applications to photochemistry and analytical chemistry. Elsevier, Amsterdam—London—N. Y.
- Z o B e l l A. E. 1964. The occurrence effects and fate of oil polluting the sea. In: Advances in water Pollution Research. Pergamon Press, London.
-

УДК 581.132 : 576.809.56

Фотосинтез, деструкция органического вещества и динамика численности бактерий Рыбинского водохранилища в 1968 г. Кузнецов С. И., Романенко В. И., Кузнецова Н. С. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 3—12.

1968 год характеризовался средней водностью, и колебания уровня воды в Рыбинском водохранилище почти полностью соответствовали колебаниям в 1967 г. Кислородный режим был весьма благоприятным, насыщение воды кислородом не падало ниже 85%. Продукция органического вещества за счет фотосинтеза фитопланктона за навигационный период с мая по ноябрь равнялась 41 г С/1 м², а продукция бактериальной биомассы — 21 г С/1 м². Деструкция органического вещества в водной массе соответствовала за тот же период 67, а в иловых отложениях — 18 г С/1 м² и достигала максимума в период отмирания планктона. Общая численность бактерий в среднем была немного ниже, чем в 1967 г., и равнялась 1.37 млн в 1 мл, а зимой — 0.68 млн в 1 мл. Анализы показали, что наилучшие результаты определения времени генерации и продукции бактериальной биомассы получаются при использовании изотопного метода по гетеротрофной ассимиляции СО₂. Наиболее быстрое размножение бактерий — до двух генераций в сутки — происходило в период наибольшего прогрева воды (20—22°). Илл. — 3, табл. — 11, библи. — 7 назв.

УДК 576.809.56

Микробиологическая характеристика Рыбинского водохранилища в 1969 г. Кузнецов С. И., Романенко В. И. и Кузнецова Н. С. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 13—23.

Уровень воды в водохранилище в 1969 г. близко совпадал с тем, что наблюдалось в предыдущем, 1968 г. Продукция органического вещества за счет фотосинтеза фитопланктона за летний период равнялась 65 г С на 1 м² или, в пересчете на валовую первичную продукцию, — 81 г С/м² и составила около 0.14% от величины солнечной радиации. Продукция бактериальной биомассы равнялась за тот же период 35 г С/м². Общая численность бактерий в среднем составляла 1.58 млн в 1 мл, т. е. была на 200 000 больше, чем в предыдущем году. Деструкция органического вещества в течение сезона имела максимум в конце июля и вторично небольшое увеличение в конце сентября. В среднем за вегетационный период деструкция в водной массе водохранилища составляла 113 г С под 1 м², а в иловых отложениях — 28 г С на 1 м². Время генерации бактерий хорошо коррелировало с температурой воды, достигая наименьшей величины в 13 час. в начале августа при наиболее высоких температурах воды. Илл. — 5, табл. — 14, библи. — 11 назв.

УДК 577.486 (28)

К количественной характеристике экосистемы пелагиали оз. Дальнего на Камчатке. Сорокин Ю. И. и Павельева Е. Б. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 24—38.

Исследовалась структура экосистемы оз. Дальнего и продукционные характеристики отдельных ее компонентов. Одной из первоначальных причин формирования слоистой структуры является физическая стратификация самой водной толщи в пределах евфотической зоны и связанное с ней образование слоя повышенной концентрации фитопланктона у верхней границы термоклина. Продукция фотосинтеза фитопланктона в период массового цветения диатомовых водорослей (начало июля) составляла 4.8 г С/м², снижаясь в конце месяца в 30 раз. Максимальная биомасса фитопланктона достигала 8 г/м³, снижаясь в конце месяца в 60 раз. Биомасса и продукция бактериопланктона по мере отмирания фитопланктона возрастала в 2 раза. Нарастание биомассы бактериопланктона сопровождалось массовым развитием простейших, максимальная биомасса которых достигала 2 г/м³. С появлением простейших в массовом количестве развивается хищная коловратка аспланхна, питающаяся ими. Популяция колоподов существует в иле в виде колоподитов. Взрослые циклопы и диатомусы появляются в конце июля и совершают вертикальные миграции. Максимальная биомасса колопод достигает 3 г/м³. Полученные данные использованы для ориентировочных расчетов потока энергии в экосистеме озера в течение июля, в первую фазу вегетационного периода, и для кибернетического моделирования экосистемы оз. Дальнего. Илл. — 18, табл. — 4, библи. — 24 назв.

УДК 543.38

Органическое вещество в воде р. Волги и ее водохранилищ в июне 1966 г. и в июле 1969 г. Скопинцев Б. А., Бакулина А. Г., Бикбулатова Е. М., Кудрявцева Н. А., Мельникова Н. И. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 39—53.

Величины перманганатной окисляемости вод р. Волги и ее водохранилищ, определенной в июне 1966 г. по трассе судового фарватера на участке от Рыбинского водохранилища до г. Куйбышева, мало отличались от результатов, полученных в весенне-летний период 1954—1955 гг. Количество органического углерода в сухих остатках выпаренных вод в июне 1966 г. близко к значениям кислорода перманганатной окисляемости. Содержание валового органического углерода в воде изменялось вниз по Волге до г. Астрахани от 10.3 до 7.2 мг С/л и в среднем было выше на 6% содержания углерода в сухих остатках. БПК₅ на исследованном участке колебалось от 0.72 до 2.3 мг О/л. Илл. — 1, табл. — 5, библи. — 10 назв.

УДК 543.38

Органическое вещество в воде Онежского озера и некоторых водоемов Волго-Балтийского водного пути летом 1968 г. Скопинцев Б. А., Бакулина А. Г., Мельникова Н. И. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 54—61.

Содержание органического углерода в поверхностных и глубинных водах открытой части Онежского озера в июле 1988 г. колебалось от 5,7 до 5,9 мг/л. Отношение кислорода перманганатной окисляемости к органическому углероду в среднем было равно 1,1. За 120 суток хранения при температуре около 20° органическое вещество воды Онежского озера в среднем окисляется на 14—18%, а вод Рыбинского и Шекснинского водохранилищ, Белого и Сиверского озер — на 23—28%. Табл. — 4, библи. — 20 назв.

УДК 556.555.7

Сезонная динамика содержания и поступления органического вещества в Шекснинский плес Рыбинского водохранилища. Рощупко В. Ф. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима водных водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 62—72.

В общем количестве преобладают гумусовые органические вещества почвенно-торфяного происхождения. В среднем за десятилетие (1958-1967 гг.) в составе органических веществ воды Шекснинского плеса окрашенные соединения преобладали в пределах первого полугодия. В июле относительно увеличивалось содержание слабоокрашенного вещества, а с сентября по декабрь устойчиво преобладали малоокрашенные соединения. После создания Шекснинского водохранилища значения показателей содержания органического вещества в единице объема воды увеличились, а их общее количество в участке уменьшилось в связи с сокращением объема поступающей через плотину воды. До зарегулирования Шексны относительное преобладание малоокрашенных веществ было характерно для периода с октября по март, после зарегулирования — с июля по декабрь. В остальное время года относительно увеличилась доля окрашенных органических веществ. Илл. — 5, табл. — 3, библи. — 18 назв.

УДК 546.17 : 628.113

Содержание и распределение соединений азота в Рыбинском водохранилище в летне-осенний период. Трифонова Н. А., Калинина Л. А. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима водных водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 73—79.

В статье изложены результаты наблюдений за изменением количества соединений азота в воде Рыбинского водохранилища в летне-осенний период, приводятся данные по содержанию в воде общего, органического, аммонийного, нитритного и нитратного азота. Установлено наличие летом определенной зависимости содержания органического азота от количества фитопланктона, а также отсутствие в этот период существенного влияния размещения водных масс на содержание и распределение соединений азота в водохранилище. В осенний период размещение в Рыбинском водохранилище вод различного происхождения лишь в малой степени влияет на распространение соединений азота. Илл. — 4, табл. — 2, библи. — 7 назв.

УДК 564.1 : 627.8

Элементы баланса биогенных элементов в Куйбышевском водохранилище. Гусева Н. Н. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима водных водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 80—89.

Содержание и величины поступления биогенных веществ в Куйбышевское водохранилище и их вынос изменяются по годам и сезонам в соответствии с водностью года. Вынос биогенных веществ в нижний бьеф меньше, чем их поступление в водохранилище (за счет аккумуляции водного стока, осадения, потребления и др.). Повышенная аккумуляция биогенных веществ по сравнению с аккумуляцией воды выявлялась в некоторые годы для кремния (до 30%) и железа (до 44%). В отдельных случаях наблюдалось превышение выноса биогенных веществ (главным образом органических форм, азота, фосфора) по сравнению с их поступлением, что свидетельствует об интенсивном пополнении водохранилища биогенными веществами за счет биологических процессов. Полученные материалы дают основание считать, что высокий водообмен и значительная сработка уровня мало способствуют аккумуляции биогенных веществ в Куйбышевском водохранилище. Илл. — 2, табл. — 3, библи. — 15 назв.

УДК 627.81 : 54

Научные обоснования к прогнозированию содержания биогенных элементов и органического вещества в водохранилищах. Драчев С. М. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима водных водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 90—95.

Исходными материалами для прогнозирования качества воды в водохранилищах служат данные о содержании биогенных элементов и органического вещества в водах весеннего половодья и межени в стоке рек, впадающих в водохранилища, в атмосферных осадках и сточных водах. Подчеркивается необходимость накопления сведений о содержании биогенных элементов в водах весеннего половодья, составляющих 60—80% годового стока равнинных рек в пределах СССР. Необходим учет внутриводоемных процессов: обмена между дном и водой, усвоения элементов растительными организмами, прижизненного выделения органических и минеральных соединений, воспроизводства и деградации органического вещества. Приводятся исходные данные для прогнозирования качества воды в водоемах лесной зоны. Отмечается необходимость сбора исходных материалов по основным физико-географическим зонам. Библи. — 33 назв.

УДК 581.256,325, 535

О влиянии фитопланктона на проникновение солнечной радиации в воду водных водохранилищ. Пырина И. Л., Рутковская В. А., Ильинский А. Л. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима водных водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 97—106.

Изучалось влияние фитопланктона на проникновение солнечного света в воду Куйбышевского и Волгоградского водохранилищ. На разных глубинах освещенного слоя подводным пиранометром измерялась энергия общей солнечной радиации и учитывался фитопланктон. Получены данные о распределении радиации по глубинам, а также коэффициент ее вертикального ослабления при

различном видовом составе и плотности фитопланктона. Из-за значительной мутности воды исследованных водоемов влияние фитопланктона на их подводный световой режим сравнительно невелико. Оно заметно лишь при массовом развитии синезеленых водорослей, когда вода бывает более прозрачной. Илл. — 4, табл. — 3, библ. — 18 назв.

УДК 551.48

Основные закономерности изменений физических и химических характеристик водных масс Рыбинского водохранилища. Буторин Н. В., Смирнов Н. П. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 107—127.

Изучались сезонные изменения средних значений и стандартных отклонений температуры воды, цветности, электропроводности, содержания карбонатов, кальция и жесткости водной массы Рыбинского водохранилища. Исследовалось влияние водности года на изменения средних значений перечисленных характеристик в водохранилище. С помощью разложения по естественным ортогональным функциям выделены особенности сезонной изменчивости характеристик речных вод и собственно водохранилища. Сделана попытка районирования территории водохранилища по комплексу признаков, характеризующих физическое и химическое состояние его вод. Илл. — 10, табл. — 3, библ. — 14 назв.

УДК 551.482.4

Исследование многолетних колебаний стока Волги с помощью разложения по естественным составляющим. Смирнов Н. П., Кондрацова О. Ф. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 128—146.

Для исследования многолетних колебаний стока Волги с помощью разложения по естественным составляющим были использованы данные по расходам воды на 11 створах Волги и ее главных притоков за период 1920—1964 гг. Оценка разложения полей среднегодового и среднемесячного стока свидетельствует о том, что более 75% информации о поле стока сосредоточено в первых трех векторах разложения. Анализ первых трех векторов разложения и их временных функций показал, что поле среднегодового стока достаточно однородное по всему бассейну и имеет в поле второго вектора закономерное изменение колебаний стока с запада на восток, а поле третьего вектора характеризуется изменением колебаний стока с севера на юг. Указанные особенности позволили выполнить районирование бассейна Волги по характеру многолетних колебаний стока. Частотная структура изменений во времени коэффициентов разложения свидетельствует о том, что колебания стока в бассейне Волги имеют циклические вариации с периодами около 10, 5—7 и 2—3 лет. Илл. — 10, табл. — 4, библ. — 13 назв.

УДК 551.482.215

Солнечнообусловленные колебания стока Волги. Смирнов Н. П., Кондрацова О. Ф. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 147—162.

Спектральный анализ рядов по стоку Волги, Оки и Камы после фильтрации показал, что в колебаниях стока Волги в диапазоне 9—16 лет присутствуют две циклические вариации с периодами около 9—11 и 14—15 лет. При этом в стоке Верхней и Средней Волги амплитуды этих вариаций примерно равны, а в стоке Камы и Волги ниже впадения Камы преобладает вариация с периодом 14—15 лет. Установлены различия в колебаниях стока Верхней и Средней Волги по сравнению со стоком Камы и в характере «вековой» тенденции. Сток Верхней Волги был максимальным в конце 900-х годов, после чего началось его постепенное уменьшение. Падение стока Камы в «вековой» цикле началось раньше, однако в конце второго десятилетия произошло резкое увеличение расходов Камы, которые достигли максимальных значений в начале 30-х годов, после чего сток резко уменьшился. Анализируется связь одиннадцатилетних и «вековых» колебаний стока Волги с ходом солнечной активности, через посредство изменения характера циркуляции атмосферы в северном полушарии. Илл. — 13, табл. — 3, библ. — 20 назв.

УДК 551.482.215

О природе семилетней цикличности в многолетних колебаниях стока Волги. Смирнов Н. П., Саруханиян Э. И., Кондрацова О. Ф. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 163—175.

Исследуется характер колебаний стока Волги с периодом около 6—7 лет. Делается вывод о связи указанных колебаний с нутационными движениями радиуса-вектора полюса вращения Земли. При этом максимальные значения среднегодовых расходов на створах Волги в шести-семилетнем цикле наблюдаются в годы, когда радиус-вектор полюса вращения пересекает меридиан Гринвича в зимние месяцы. Подробно анализируется связь водности бассейна Волги в шести-семилетнем цикле с характером циркуляции атмосферы в зимний период. Илл. — 10, табл. — 3, библ. — 12 назв.

УДК 551.482.215

Двухлетние циклические колебания в стоке Волги. Кондрацова О. Ф., Смирнов Н. П. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 176—185.

На основании данных по расходам воды на 12 створах за 58 лет (с 1907 по 1965 гг.) с помощью методов статистической обработки материалов показана реальность существования квазидвухлетней вариации в колебаниях стока Волги. Средний период этих колебаний составляет 29 месяцев, а за последние 32 года равен 27 месяцам. Максимум спектральной плотности выделенного цикла за редким исключением лежит выше 99% и во всех случаях превышает 95%-й уровень обеспеченности. Величина амплитуды в среднем по бассейну составляет 18% от абсолютных амплитуд рассматриваемых рядов. Фаза по бассейну изменяется таким образом, что максимум в двухлетней волне раньше всего темнеется в бассейнах Камы, Вятки и Унжи, позже, через 5—7 лет, он наступает в стоке Оки. Сток рек, формирующийся под воздействием атмосферных процессов над бассейнами, отражает в своих колебаниях их двухлетнюю периодичность. Илл. — 6, табл. — 5, библ. — 21 назв.

Опыт расчета установившихся ветровых течений на большом мелководном водоеме. Л и т в и н о в А. С. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 186—192.

Для расчета схемы течений на мелководном Белом озере использован метод полных потоков. Исходное гидродинамическое уравнение (уравнение Пуассона для неоднородной среды) решалось численным методом на ЭВМ «Наир». В результате получены векторы скорости в 16 расчетных точках по акватории озера при различных скоростях и направлениях ветра. Вычисления производились с учетом притока в озеро и стока из него и при нулевых граничных условиях на контуре водоема. Сравнение результатов расчета показало, что приток и сток из озера не оказывают сколько-нибудь существенного влияния на характер установившейся ветровой циркуляции в озере даже при небольших скоростях ветра. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с данными натурных наблюдений, проводимых на Белом озере. Илл. — 1, табл. — 2, библи. — 10 назв.

УДК 556.55

Некоторые черты гидрологического режима Саратовского водохранилища. Г о р и н Ю. И. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 193—198.

В работе рассматриваются изменения гидрологических характеристик р. Волги на участке Тольятти—Балаково после строительства Куйбышевского, а затем Саратовского гидроузлов. Эти изменения произошли прежде всего в режиме уровней — в амплитуде и интенсивности колебаний его во времени. Перераспределение стока по сезонам привело к значительному увеличению расходов в зимний период и образованию полыньи в нижнем бьефе ГЭС. Вследствие срезки пика паводков сократились площади заливных лугов и ухудшились условия нереста рыб. В результате неравномерности нагрузок Куйбышевской ГЭС в суточном и недельном аспектах изменился скоростной режим. За счет увеличения перемешивания водных масс среднедекадные температуры воды в нижнем бьефе Куйбышевской ГЭС понизились по сравнению с бытовыми в первой половине лета и повысились во второй. Физико-химические характеристики воды в основном остались без изменений. На основании анализа основных характеристик гидрологического режима предлагается районирование Саратовского водохранилища. Илл. — 4, табл. — 3, библи. — 2 назв.

УДК 556.555.6

Баланс взвешенных веществ в Рыбинском водохранилище. З и м н о в а Н. А. и К у р д и н В. П. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 199—210.

Дается оценка компонентов баланса взвесей в Рыбинском водохранилище за 25-летний период его существования (1941—1965 гг.). Основной статьей приходной части баланса является размыв берегов и дна, расходной части — осадконакопление. Рассматривается роль азональных факторов в накоплении донных отложений в рассматриваемый период. Указывается на необходимость учета фактора переработки ложа при расчетах заилиenia крупных озеровидных водохранилищ. Отмечаются изменения, происходящие в балансе взвесей в 60-е годы, заключающиеся в уменьшении образования взвесей за счет размыва славин и мелководий. На основе учета происходящих в балансе изменений делается вывод о снижении интенсивности осадконакопления и возрастных роли зональных факторов в этом процессе. Вместе с тем в связи с сокращением поступления взвешенного органического вещества из местных источников возрастает доля аллохтонных органических взвесей в общем балансе органического вещества. Табл. — 6, библи. — 34 назв.

УДК 556.555.6

Баланс взвешенных веществ в Угличском водохранилище. З и м н о в а Н. А. и К у р д и н В. П. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 211—220.

Дается оценка компонентов баланса взвешенных веществ в Угличском водохранилище за 29-летний период его существования (1940—1968 гг.). Большая часть взвесей формировалась в самом водоеме за счет размыва берегов и шла на образование вторичных донных отложений. Анализируются временные изменения в соотношении балансовых компонентов. Указывается, что в последние годы происходит относительное возрастание доли речных наносов и планктона в приходной части баланса, в расходной части почти вдвое увеличивается относительная величина сброса взвесей через Угличский гидроузел. На основе количественной оценки балансовых компонентов характеризуется общая направленность процессов формирования ложа водоема. Табл. — 4, библи. — 23 назв.

УДК 551.481.1.112.3

О наносоудерживающей способности Угличского водохранилища. К у р д и н В. П. и З и м н о в а Н. А. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 221—225.

Расчет наносоудерживающей способности Угличского водохранилища за все время его существования (1940—1968 гг.) произведен двумя способами — горизонтальных сечений и способом кривых. Наносоудерживающая способность оказалась равной 8030 тыс. т. Сходимость результатов расчета обоими способами позволяет использовать их при подсчете объемов заполнения водохранилищ, подобных Угличскому. Интенсивность заилиenia водоема (приводятся подробные таблицы накопления наносов по длине водохранилища и по интервалам глубин) возрастает к створу Угличского гидроузла, достигая наибольших значений перед плотиной. Основная часть наносов (около 50%) всех отложений водоема) откладывается в русловом углублении водохранилища. Илл. — 2, табл. — 3, библи. — 3 назв.

К оценке загрязнения Иваньковского водохранилища битумоидами. Синельников В. Е. В сб.: Органическое вещество и элементы гидрологического режима волжских водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 23(26). 1972. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 226—240.

Показаны основные источники загрязнения тяжелыми фракциями нефтепродуктов воды и дна Иваньковского водохранилища. Определено содержание легких и тяжелых фракций битумоидов на различных участках водохранилища — от г. Калинина до Иваньковской плотины. Предполагается, что загрязнение водной массы смолами и асфальтенами, связанное со стоками г. Калинина, в летний период не распространяется далее Алексино—Городни. Повышенное содержание битумоидов отмечено в воде и донных отложениях Мошковичского залива. Результаты анализов донных отложений Иваньковского водохранилища и Мошковичского залива свидетельствуют о возможности миграции битумоидов с осадками, накапливающимися в зоне седиментации. Илл. — 2, табл. — 13, библи. — 17 назв.

	Стр.
С. И. Кузнецов, В. И. Романенко и Н. С. Кузнецова. Фотосинтез, деструкция органического вещества и динамика численности бактерий в Рыбинском водохранилище в 1968 г.	3
С. И. Кузнецов, В. И. Романенко и Н. С. Кузнецова. Микробиологическая характеристика Рыбинского водохранилища в 1969 г.	13
Ю. И. Сорокин и Е. Б. Павельева. К количественной характеристике экосистемы пелагиали озера Дальнего на Камчатке	24
Б. А. Скопинцев, А. Г. Бакулина, Е. М. Бикбулатова, Н. А. Кудрявцева и Н. И. Мельникова. Органическое вещество в воде Волги и ее водохранилищ в июне 1966 г. и июле 1969 г.	39
Б. А. Скопинцев, А. Г. Бакулина и Н. И. Мельникова. Органическое вещество в воде Онежского озера и некоторых водоемов Волго-Балтийского водного пути летом 1968 г.	54
В. Ф. Рощупко. Сезонная динамика содержания и поступления органического вещества в Шекснинский плес Рыбинского водохранилища	62
Н. А. Трифонова и Л. А. Калинина. Содержание и распределение соединений азота в Рыбинском водохранилище в летне-осенний период	73
Н. Н. Гусева. Элементы баланса биогенных веществ в Куйбышевском водохранилище	80
С. М. Драчев. Научные обоснования к прогнозированию содержания биогенных элементов и органического вещества в водохранилищах	90
И. Л. Пырина, В. А. Рутковская и А. Л. Ильинский. О влиянии фитопланктона на проникновение солнечной радиации в воду волжских водохранилищ	97
Н. В. Буторин и Н. П. Смирнов. Основные закономерности изменений физических и химических характеристик водных масс Рыбинского водохранилища	107
Н. П. Смирнов и О. Ф. Кондрацова. Исследования многолетних колебаний стока Волги с помощью разложения по естественным составляющим	128
Н. П. Смирнов, Э. И. Саруханян и О. Ф. Кондрацова. Солнечнообусловленные колебания стока Волги	147
Н. П. Смирнов, Э. И. Саруханян и О. Ф. Кондрацова. О природе семилетней цикличности в многолетних колебаниях стока Волги	163
О. Ф. Кондрацова и Н. П. Смирнов. Двухлетние циклические колебания стока Волги	176
А. С. Литвинов. Опыт расчета установившихся ветровых течений на большом мелководном водоеме	186
Ю. И. Горин. Некоторые черты гидрологического режима Саратовского водохранилища	193
Н. А. Зиминова и В. П. Курдин. Баланс взвешенных веществ в Рыбинском водохранилище	199
Н. А. Зиминова и В. П. Курдин. Баланс взвешенных веществ в Угличском водохранилище	211
В. П. Курдин и Н. А. Зиминова. О наносоудерживающей способности Угличского водохранилища	221
В. Е. Синельников. К оценке загрязнения Ивановского водохранилища битумоидами	226
Рефераты	241

S. I. Kuznetsov, V. I. Romanenko a. N. S. Kuznetsova. Photosynthesis, destruction of organic matter and dynamics of number of bacteria in the Rybinsk reservoir	3
S. I. Kuznetsov, V. I. Romanenko a. N. S. Kuznetsova. Microbiological characteristic of the Rybinsk reservoir	13
Yu. I. Sorokin a. E. B. Pavelieva. Quantitative characteristic of the ecosystem in pelagial of the Dalnyi lake of the Kamchatka	24
B. A. Skopintsev, A. G. Bakulina, E. M. Bikhulatova, N. A. Kudrayvtseva a. N. I. Melnikova. Organic matter in water of the Volga and its reservoirs in summer period	39
B. A. Skopintsev, A. G. Bakulina a. N. I. Melnikova. Organic matter in water of the Onezhskoe lake and of some water-bodies of the Volga-Baltic waterway	54
V. F. Roshchupko. Seasonal dynamics of content and entering of organic matter into the Sheksninskaya part of the Rybinsk reservoir	62
N. A. Trifonova a. L. A. Kalinina. Content and distribution of nitrogen compounds in the Rybinsk reservoir in summer-autumn period	73
N. N. Guseva. Elements of balance of biogenous substances in the Kuibyshevsk reservoir	80
S. M. Drachev. Scientific foundations for forecasts of contents of biogenous elements and organic matter in reservoirs	90
I. L. Pyrina, V. A. Rutkovskaya a. A. L. Ilyinski. Influence of phytoplankton on penetrating solar radiation into water of the Volga reservoirs	97
N. V. Butorin a. N. P. Smirnov. Main laws governing changes of physical and chemical characteristics of water masses in the Rybinsk reservoir	107
N. P. Smirnov a. O. F. Kondratsova. Investigation of many-year Volga effluent fluctuations with a help of expansion into natural components	128
N. P. Smirnov, E. I. Sarukhanyan a. O. F. Kondratsova. Solar-conditioned fluctuations of the Volga effluent	147
N. P. Smirnov, E. I. Sarukhanyan a. O. F. Kondratsova. Nature of seven-yearly cycles in many-annual fluctuations of the Volga effluent	163
O. F. Kondratsova a. N. P. Smirnov. Two-year cyclic fluctuations of the Volga effluent	176
A. S. Litvinov. Experience in estimating stable wind-conditioned currents in a large shallow water-body	186
Yu. I. Gorin. Some characters of hydrological regime of the Saratovsk reservoir	193
N. A. Siminova a. V. P. Kurdin. Balance of suspended matter in the Rybinsk reservoir	199
N. A. Siminova a. V. P. Kurdin. Balance of suspended matter in the Uglichsk reservoir	211
V. P. Kurdin a. N. A. Siminova. Drift-holding capacity of the Uglichsk reservoir	221
V. E. Sinelnikov. Evolution of pollution of the Ivankovsk reservoir by bituminous substances	226
Summery	241

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО
И ЭЛЕМЕНТЫ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА
ВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Труды Института биологии внутренних вод,
вып. 23 (26)

*Утверждено к печати
Институтом биологии внутренних вод
Академии наук СССР*

Редактор издательства Е. А. Чекулаева
Художник В. В. Грибакин
Технический редактор Г. А. Смирнова
Корректоры Г. Н. Атлас и Э. Н. Липпа

Сдано в набор 27/III 1972 г. Подписано к печати 21/VII
1972 г. Формат бумаги $70 \times 108^{1/16}$. Бумага № 2. Печ. л.
 $15^{1/2}=21.70$ усл. печ. л. Уч.-изд. л. 22.43. Изд. № 4867.
Тип. зак. № 989. М-10083. Тираж 900. Цена 2 р. 24 к.

Ленинградское отделение издательства «Наука»
199164, Ленинград, Менделеевская линия, д. 1¹

1-я тип. издательства «Наука».
199034, Ленинград, 9 линия, д. 12