

АКАДЕМИЯ НАУК СССР



ХИМИЗМ

ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ
И ФАКТОРЫ
ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ
И САМООЧИЩЕНИЯ



А К А Д Е М И Я Н А У К С С С Р
И Н С Т И Т У Т Б И О Л О Г И И В Н У Т Р Е Н Н И Х В О Д

Т Р У Д Ы, В Ы П У С К 18 (21)

ХИМИЗМ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ И ФАКТОРЫ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И САМООЧИЩЕНИЯ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Л Е Н И Н Г Р А Д • 1968

Ответственный редактор

С. И. Кузнецов

Редактор издания

Б. К. Штегман

2-10-4
344-68 (II)

ФОРМИРОВАНИЕ, ПЕРЕМЕЩЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДНЫХ МАСС ГОРЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Введение

Каждый континентальный водоем, в том числе и любое водохранилище, представляет собой одну из фаз единого процесса стока. Этот процесс имеет характер перемещения и обмена водных масс, каждая из которых обладает определенными свойствами: температурой, плотностью, составом и концентрацией растворенных и взвешенных веществ и т. д. (Муравейский, 1960). Таким образом, процесс стока — явление не только количественное, но и качественное, и поэтому наиболее полное познание его возможно путем одновременного изучения обеих сторон этого единого процесса. В водохранилищах наиболее ярко проявляется взаимосвязь этих двух сторон стока, так как распределение разнокачественных объемов вод (водных масс) и интенсивность изменения их свойств тесно связаны с режимом регулирования водного баланса и водообменом этих искусственных водоемов. Исходя из указанного, лабораторией гидрологии Института биологии внутренних вод АН СССР под руководством Н. В. Буторина в 1960 г. были начаты исследования водных масс верхневолжских водохранилищ. Составной частью этой программы и является данная работа, в которой обобщаются результаты трехлетних исследований водных масс Горьковского водохранилища.

Строительство Горьковского гидроузла у г. Городца и наполнение водохранилища до нормального подпорного горизонта (НПГ) было закончено весной 1957 г. Основное назначение этого гидросооружения — энергетическое и транспортное использование стока Волги (Непорожний и Филахтов, 1960). Оно представляет собой четвертую замыкающую ступень верхневолжского каскада гидроэлектростанций.

Горьковское водохранилище — сильно вытянутый и относительно неширокий водоем, образовавшийся в результате затопления дна долины Волги и ряда ее притоков. Подпор от Горьковской плотины распространяется по Волге вплоть до Рыбинского гидроузла, а по крупнейшему притоку водохранилища Унже — на 65—70 км от ее бывшего устья. Длина водоема 434 км, средняя его ширина около 3,5 км, наибольшая — 16 км. По своим размерам (площадь зеркала 1570 км², объем 8,7 км³ при НПГ) водоем входит в число десяти наиболее крупных водохранилищ европейской части Советского Союза, но среди них он наиболее мелководен: средняя его глубина 5,5 м, наибольшая в русле Волги у плотины 22 м. Водоохранилище обеспечивает сезонное регулирование стока и необходимые для судоходства глубины не только в его верховьях, у Рыбинска, но и на незарегулированном еще участке Волги ниже Горьковского гидроузла. Характерной чертой водоема как одного из звеньев каскада водохранилищ является высокая степень регулирования стока с его

бассейна. Рыбинское и другие водохранилища верхней Волги сильно трансформируют как в количественном, так и в качественном отношении приток в водоем с $\frac{2}{3}$ его водосбора. Водоохранилище имеет большое число разнообразных по химизму воды притоков, сток которых составляет около 40% приходной части годового водного баланса водоема.

Горьковское водохранилище относится к ряду наиболее изученных в гидрологическом и биологическом отношении водоемов нашей страны. Поэтому мы считаем возможным, не приводя здесь общей гидрологической характеристики водохранилища, перейти к изложению методов и результатов исследования водных масс этого водоема. Первыми работами в этом направлении были 4 съемки Горьковского водохранилища, выполненные А. А. Зениным (1961) в мае и августе 1957 и 1958 гг., и скоростная съемка температуры и электропроводности воды, произведенная В. И. Рутковским (1963) в июне 1960 г. В этих съемках была установлена значительная неоднородность вод, наполняющих озерную часть водохранилища. Особенности распределения по акватории физических и химических характеристик объяснялись авторами наличием в пределах водоема вод различного происхождения, поступающих сюда из Рыбинского водохранилища и по крупным притокам — Унже, Немде и др.

Таким образом, выполненные ранее измерения указали нам на возможность изучения распределения физических и химических характеристик и динамики вод водохранилища методом анализа водных масс, понимая под этим термином генетически однородные объемы вод, обладающие рядом определенных физико-химических и биологических свойств (Буторин, 1965а). Предварительные результаты исследования водных масс Горьковского водохранилища были опубликованы в ряде статей (Эдельштейн, 1965а, 1965б, 1966, 1967), полные материалы наблюдений на водоеме приводятся в настоящей работе. Целью ее является попытка показать взаимосвязь количественной и качественной стороны процесса стока в водохранилище, проявляющуюся в процессах формирования и трансформации его водных масс; дать характеристику как поступающих, так и формирующихся в нем водных масс; установить закономерности размещения этих масс в водоеме и по особенностям их перемещения составить представление о процессе внутреннего водообмена водохранилища и отдельных его частей.

При наблюдениях и камеральной обработке материалов автору помогали лаборанты В. И. Внучкова, Н. М. Сизова, Л. А. Угарова, студенты МГУ С. А. Филь и Н. Н. Виноградова. Дополнительные данные по химизму вод водохранилища были любезно предоставлены нам Ф. И. Безлером, Н. А. Трифоновой и А. В. Фотиевым. Большую помощь в организации исследований и при написании работы оказали старший научный сотрудник Н. В. Буторин и проф. Б. Б. Богословский. Всем им автор выражает свою глубокую признательность.

ОБЪЕМ И МЕТОДИКА ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Для изучения водных масс Горьковского водохранилища в 1961—1963 гг. было организовано 11 рейсов, во время которых удалось выполнить 21 гидрологическую съемку водоема с общим числом станций около 1000. Сроки отдельных съемок, характер и объем полевых наблюдений представлены в табл. 1. В период навигации рейсы проводились на экспедиционных судах Института биологии внутренних вод АН СССР, зимние рейсы — на автомашине (наблюдения велись в пешеходных маршрутах). Весной, в период вскрытия водохранилища, наблюдения производились как непосредственно с борта ледокола «Дон», так и со льда в ряде пешеходных маршрутов.

Т а б л и ц а 1

Характер и объем полевых работ

№ съемок	Рейс	Дата	Речная часть водо-хранилища			Озерная часть водохрани-лища		Приустьевые заливы	
			количество станций	количество поперечных разрезов	количество разрезов вдоль судо-вого хода	количество станций	количество поперечных разрезов	количество станций	количество продольных разрезов
1961									
1	I-a	18 VI—5 VII	12	—	—	35	9	28	6
2	I-б	8—11 VII	14	—	—	11	—	—	—
3	II-a	23—28 VII	30	7	—	41	9	—	—
4	II-б	29 VII—1 VIII	19	—	—	9	—	—	—
1962									
5	I-a	15—23 VI	8	1	1	37	8	18	6
6	I-б	28—30 VI	5	1	—	32	7	1	—
7	II-a	17—27 VII	6	1	1	26	5	23	8
8	II-б	31 VII—1 VIII	3	1	1	36	8	5	1
9	III-a	28 VIII—7 IX	6	23	1	35	8	29	9
10	III-б	10—14 IX	6	18	1	36	8	2	—
11	IV-a	17—26 X	8	4	1	36	8	25	9
12	IV-б	28—30 X	4	—	—	36	8	2	—
1963									
13	I зимний	2—15 II	4	—	—	15	3	19	—
14	II зимний	27 III—4 IV	6	—	—	17	4	19	—
15	Весенний	24 IV—3 V	—	—	1	22	5	—	—
16	I-a	15—22 V	4	12	1	37	10	22	8
17	I-б	23—24 V	—	—	—	36	8	—	—
18	I-в	26—30 V	6	10	1	12	3	2	—
19	II-a	27 VI—5 VII	4	24	1	40	9	26	10
20	II-б	7—8 VII	—	—	—	39	9	2	—
21	II-в	9—12 VII	6	20	1	15	5	5	—
И т о г о . . .			151	122	11	603	134	228	57

П р и м е ч а н и е. Обозначения: а — направление перемещения экспедиции от Рыбинска к Гордцу; б — перемещение экспедиции в обратном направлении; в — дополнительная съемка водных масс в Юрьевском расширении.

В навигационный период график каждого рейса строился следующим образом. В течение первых 2—4 дней производилась съемка речной части водохранилища от Рыбинского гидроузла до Юрьевца, в последующие 4—5 дней — детальная съемка озерной части водоема. Спустя 3—4 дня предпринималась повторная сокращенная съемка озерной части длительностью 1—2 дня, позволявшая проследить изменения границ водных масс, происшедшие в течение 7—10 суток. Рейс завершался повторной съемкой речной части водохранилища от Юрьевца до Рыбинской ГЭС.

Методика съемки речной части водоема постепенно совершенствовалась. В рейсах 1961 г. наблюдения производились только на ряде станций, равномерно распределенных вдоль волжского судового хода. На станциях выполнялся полный комплекс гидрологических наблюдений, включая измерение течений. При этом было установлено, что в речной части

водохранилища водная масса в большинстве случаев однородна по вертикали, в то время как вдоль продольной оси водоема нередко имели место заметные изменения ее гидрологических характеристик. Поэтому в первых двух рейсах 1962 г. число станций здесь было сокращено, но измерения температуры и электропроводности поверхностного слоя воды стали производиться через каждый километр вдоль судового хода — подобная методика применялась В. И. Рутковским (1963). Таким образом, были обнаружены резкие колебания этих показателей на участках ниже впадения крупных притоков, которые объяснялись неоднородностью воды по поперечному сечению водоема. В последующих рейсах, помимо 4—6 опорных гидрологических станций, ниже устьев наиболее крупных притоков речной части водохранилища выполнялись разрезы с частым (через 100—150 м) отбором проб воды с поверхности для определения в них температуры и электропроводности. Такие разрезы располагались в 8—10 км друг от друга на протяжении всего участка, где обнаруживалось влияние вод притока.

Детальная съемка озерного района водохранилища состояла из наблюдений на продольных разрезах целого ряда приустьевых заливов и на поперечных разрезах в открытой части водоема от Юрьевца до Горьковской плотины. Наблюдения велись в заливах по рекам Мере, Желвате, Елнати, Немде, Унже, Моче, Ячменю, Санихте и Югу, в каждом из которых размещалось от 2 до 5 гидрологических станций. Верхнюю из них мы стремились назначить в зоне выклинивания подпора, где имеется постоянное стоковое течение. Однако на нескольких малых притоках — Желвате, Санихте, Юге и др. — этого достичь не удалось из-за различного рода преград: мостов, западней, мелководий. В расширенной части водохранилища съемка производилась по 8 поперечным разрезам (рис. 1). В характерных участках поперечников (бывшее русло Волги, затопленные русловые бровки, пойменные и прибрежные участки) были назначены постоянные гидрологические станции. Таким образом, при детальной съемке озерной части водохранилища общее число станций достигало 60—70. При повторной сокращенной съемке озерного района наблюдения велись только на поперечных разрезах открытой части водохранилища. Кроме станций, во время съемок на отдельных разрезах производились учащенные (через 1—2 км) определения температуры и электропроводности поверхностного слоя воды, что позволяло уточнить местоположение границ водных масс.

На гидрологических станциях определялись вертикальное распределение температуры и электропроводности воды термокаппаметром (Ершова и Эдельштейн, 1966), ее прозрачность и цвет по белому диску. Кроме того, в поверхностном и придонном горизонтах отбирались пробы воды на pH и химический анализ. Последний производился в экспедиционных условиях и ограничивался определениями общей жесткости, концентрации гидрокарбонатов по общепринятой методике (Алекин, 1954), а также суммы сильных кислот при помощи ионообменных колонок (Подгорный и Фотиев, 1958). В последних двух рейсах выполнялись определения содержания растворенного кислорода у поверхности и у дна.

Помимо гидрологических съемок, в озерной части водохранилища было выполнено несколько суточных станций, во время которых наблюдалось суточное изменение величин отдельных показателей водных масс при различных погодных условиях, а также измерялись течения. Методика подобных наблюдений была разработана ранее на Рыбинском водохранилище (Эдельштейн, 1963).

В зимних и весенних рейсах мы были вынуждены значительно сократить количество станций и ограничиться определениями только температуры, электропроводности, цветности и pH воды.

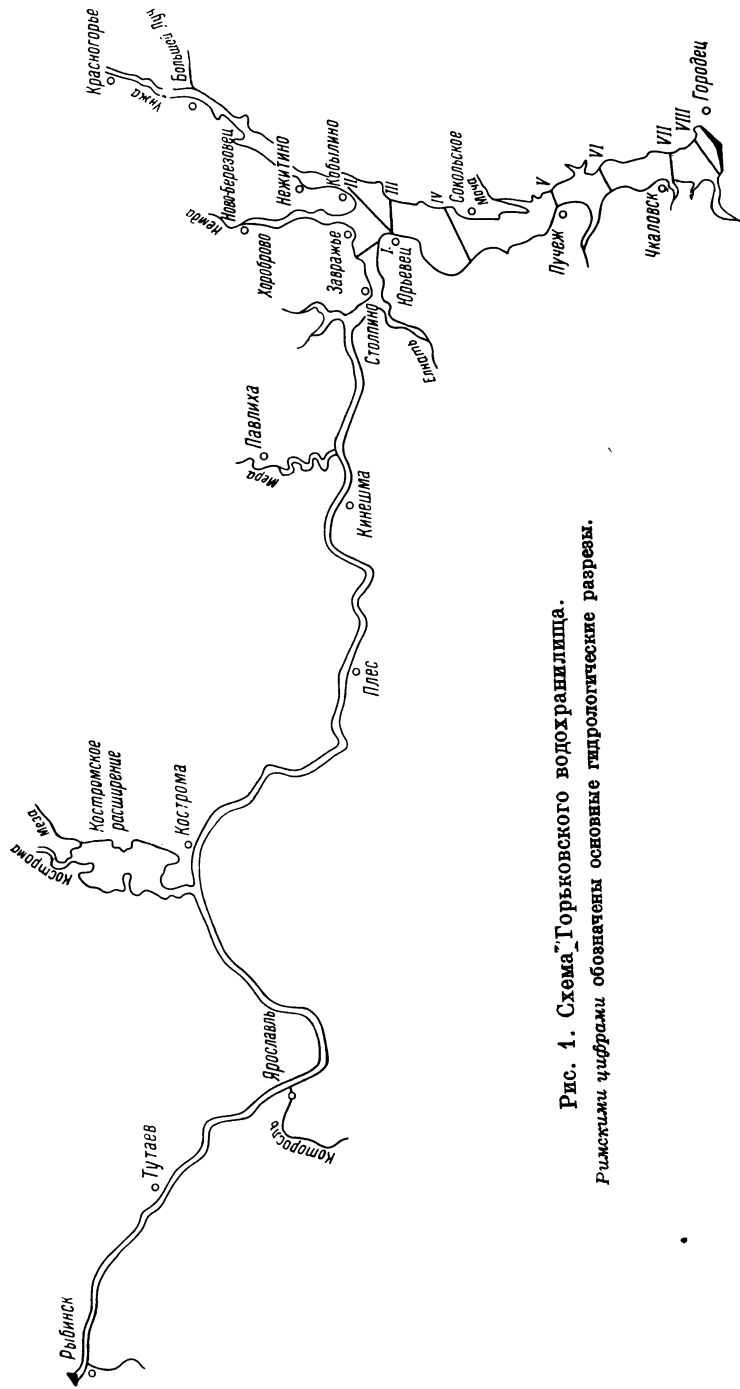


Рис. 1. Схема Горьковского водохранилища.
Римскими цифрами обозначены основные гидрологические разрезы.

Гидрологические работы сопровождались регулярными метеорологическими наблюдениями. Во время рейсов через каждые 2 часа определялись температура и влажность воздуха, направление и скорость ветра, а также атмосферное давление и облачность.

ПОКАЗАТЕЛИ И МЕТОД ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДНЫХ МАСС

В качестве показателей водных масс Горьковского водохранилища использовались следующие легко поддающиеся полевому экспресс-анализу характеристики воды: температура, электропроводность,¹ прозрачность, цветность, содержание гидрокарбонатов и растворенного кислорода, общая жесткость и рН. Перечисленные показатели можно условно подразделить на две группы, различающиеся по степени консервативности того или иного свойства водной массы. К наиболее консервативным из них могут быть причислены содержание гидрокарбонатов, жесткость, электропроводность и цветность. Консерватизм первых двух показателей определяется состоянием карбонатно-кальциевого равновесия, относительная стабильность которого в водах водохранилища и его притоков связана с пониженной (по сравнению с нормальной) насыщенностью вод карбонатом кальция (Моричева, 1965). Поскольку ионы HCO_3^- , Ca^{2+} и Mg^{2+} доминируют в химическом составе вод водоема и относительные изменения этого состава незначительны (Зенин, 1964), величина электропроводности воды зависит в основном от концентрации указанных ионов и также является достаточно консервативной характеристикой. Возможность применения цветности как показателя генезиса вод водохранилищ подробно обоснована М. А. Фортунатовым (1959). Итак, показатели первой группы практически не меняют своих значений в продолжение того времени, пока водная масса находится в водохранилище, и поэтому они могут служить хорошими индикаторами ее происхождения и трансформации за счет смешения с другими массами.

Ко второй группе показателей следует отнести температуру, прозрачность, рН и содержание кислорода. Они могут сильно изменять свои значения в результате термических, динамических, биохимических и других процессов, протекающих внутри одного и того же генетически единого объема воды. Эти показатели являются индикаторами трансформации водной массы, связанной с погодными условиями, морфологией и водообменом отдельных участков водоема. Как уже указывалось, такое деление характеристик воды в большой мере условно, так как в отдельных случаях показатели второй группы могут являться неплохими индикаторами происхождения водных масс (например, температура воды ранней весной и поздней осенью, прозрачность и рН в периоды интенсивных дождевых паводков, содержание кислорода зимой и т. д.).

Репрезентативность показателя водной массы зависит не только от его консерватизма. Если различие между значениями показателя двух или более находящихся в водоеме водных масс невелико по сравнению с возможной ошибкой метода определения его величины, такой, даже достаточно консервативный, показатель нельзя считать пригодным для выделения водных масс. В табл. 2 приводятся максимальный размах варьирования значений ряда показателей водных масс: R_{max} в моменты съемок Горьковского водохранилища, средняя погрешность их определения ϵ и отношение первой величины ко второй K . Чем больше значение параметра K , тем показатель репрезентативней. Наименее надежными

¹ Здесь и далее под словом «электропроводность» подразумевается удельная электропроводность воды, приведенная по таблице Плейсснера (Pleissner, 1909) к температуре 18° и выраженная в мксим./см (1 мксим./см = 1.10^{-8} ом⁻¹см⁻¹).

характеристиками с рассматриваемой точки зрения оказались прозрачность, рН и особенно сумма сильных кислот. От использования последней в качестве показателя при последующем анализе водных масс водохранилища мы были вынуждены отказаться именно по этой причине, несмотря на весьма большую консервативность ионов SO_4^{2-} и Cl^- .

Т а б л и ц а 2
Сравнение репрезентативности показателей водных масс
Горьковского водохранилища

Показатели	Максимальный размах варьирования R_{\max}	Средняя погреш- ность определе- ния, ϵ	Параметр репрезен- татив- ности $K = \frac{R_{\max}}{\epsilon}$
Температура, °C	6.9	0.1	69
Электропровод- ность, мксим./см	212	5	42
Общая жесткость, мг-экв./л	2.38	0.07	34
Содержание гид- рокарбонатов, мг-экв./л	2.99	0.10	30
Цветность, град.	140	5	28
Прозрачность, см	160	10	16
рН	1.0	0.1	10
Сумма сильных кислот, мг-экв./л	0.71	0.09	8

Выделение водных масс водохранилища производилось комплексным методом, заключавшимся в анализе пространственного распределения в водоеме всех перечисленных показателей. Данные, полученные в гидрологических съемках, наносились на отдельные карто-схемы для каждого из показателей. Затем проводились изолинии через интервалы, большие или равные возможной ошибке метода измерения соответствующего показателя. В тех съемках, когда наблюдалась существенная стратификация какого-либо показателя, карто-схемы строились для поверхностного и придонного горизонтов, в остальных случаях — только для поверхностного слоя воды.

На карто-схемах районы размещения водных масс характеризовались отсутствием или сильным разряжением изолиний показателей, в то время как во фронтальных зонах имело место значительное сгущение изолиний. В качестве условной границы двух водных масс, по-видимому, следовало бы принимать линию, соединяющую точки, в которых наблюдалось 50%-е смешение соседних водных масс. Однако массовый расчет по формуле смешения весьма трудоемок, поэтому границу водных масс, или гидрологический фронт, мы проводили по методу В. К. Агенорова (1944). Путем расчета горизонтального градиента электропроводности, являющейся наиболее консервативным и репрезентативным из всех определявшихся показателей, устанавливались пункты, в которых этот градиент имеет максимальное значение. Линия, или, точнее, плоскость, объединяющая такие пункты, и принималась в качестве границы водных масс.

На примере двух гидрологических съемок озерной части водохранилища были сопоставлены местоположения фронтов, проведенных по максимуму градиента электропроводности, и линии 50%-го смешения водных масс, определенные по той же электропроводности. В подавляющем большинстве рассмотренных примеров линии фронта, определенные этими двумя способами, полностью совпадали, и только в нескольких случаях было отмечено их несовпадение. При анализе этих случаев создалось

впечатление, что линия максимальных градиентов и линия 50%-го смешения не совпадают тогда, когда в расчет по формуле смешения вводятся показатели одной из масс, не «чистой», а уже несколько трансформированной за счет смешения с другой водной массой.

Сопоставление линий фронта, проведенных для тех же двух съемок по максимальным горизонтальным градиентам различных показателей (электропроводность, содержание гидрокарбонатов, общая жесткость, цветность), показало полную их идентичность. Результаты этих двух проработок методического характера указывают на то, что в качестве условной границы двух водных масс Горьковского водохранилища можно принимать плоскость, соединяющую точки с максимальными значениями градиента электропроводности воды. При этом отметим, что проведение границ между двумя географическими комплексами (в водоемах — водными массами) по максимуму градиента характеристики распространено не только в океанологии (Агеноров, 1944; Муромцев, 1953), но и в ландшафтоведении, когда при картировании требуется определить местоположение природной границы между ними (Арманд, 1955).

ИСХОДНЫЕ ВОДНЫЕ МАССЫ

Исходными водными массами, из которых формируется водная масса собственно Горьковского водохранилища, являются воды, поступающие в него из Рыбинского водохранилища (в дальнейшем называемые Волжской водной массой), и сток притоков. Осадки на зеркало водоема, склоновый и подземный сток составляют немногим более 2—3% приходной части годового водного баланса водохранилища, и поэтому их роль в трансформации водных масс водоема ничтожна. Рассматривая в настоящей работе водный режим и физико-химические свойства исходных водных масс во входных створах относительно водохранилища, мы не останавливаемся подробно на вопросах их формирования. Водным массам Рыбинского водохранилища посвящен ряд работ Н. В. Буторина (1965а, 1965в, и др.), а изучение процесса формирования речных водных масс требует постановки специальных исследований на водосборе водохранилища.

ВОЛЖСКАЯ ВОДНАЯ МАССА

Объем волжской водной массы, поступающей в течение года в Горьковское водохранилище, определяется величиной годового стока с бассейна Рыбинского водохранилища, измененной в результате регулирования стока тремя верхними водохранилищами волжского каскада. Оценка влияния этого каскада в целом, и Рыбинского водохранилища в частности, на годовой сток Волги была произведена А. П. Браславским, Р. Ф. Бюригом и З. А. Викулиной (1951). Авторы пришли к заключению, что влияние Рыбинского водохранилища на изменение годового стока невелико. Исходя из водного баланса этого водоема за 1941—1947 гг. и диспетчерских правил регулирования стока для Рыбинского гидроузла, они установили, что в маловодные годы с обеспеченностью более 90% возможно не только восполнение потерь стока на испарение и питание канала им. Москвы, составляющих около 12% среднего многолетнего стока Волги, но и увеличение стока в среднем на 10% за счет сработки многолетней призмы регулирования Рыбинского водохранилища.

В настоящее время имеется возможность уточнить степень влияния Рыбинского водохранилища на годовой сток Волги и определить изменчивость этой величины, используя фактические данные по сбросам Рыбинского гидроузла за семнадцатилетний период (1947—1963 гг.), прошедший после завершения наполнения полезной емкости водохранилища. В табл. 3 сопоставлены величины притока в Рыбинское водохранилище,

рассчитанные Т. Н. Курдиной и частично опубликованные в работе по водному балансу водоема (Рутковский и Курдина, 1959), и сбросы через Рыбинский гидроузел. Приведенные в таблице величины характеризуют сток в течение гидрологического года, с апреля по март последующего года.

Т а б л и ц а 3
Изменение годового стока Волги Рыбинским водохранилищем
в 1947—1963 гг.

Годы	Среднегодовые расходы воды, м ³ /сек.		Изменение стока		Обеспеченность притока, %
	приток	сток	м ³ /сек.	% от притока	
1947	1124	951	—173	—15.3	35
1948	942	753	—189	—20.0	54
1949	879	910	+ 31	+ 3.5	65
1950	1042	995	— 47	— 4.5	37
1951	916	1015	+ 99	+10.8	58
1952	1176	941	—235	—20.0	23
1953	1470	1410	— 60	— 4.1	3
1954	881	962	+ 81	+ 9.2	65
1955	1497	1435	— 62	— 4.1	3
1956	1211	971	—240	—19.8	19
1957	1378	1447	+ 69	+ 5.0	8
1958	1297	1192	—105	— 8.1	13
1959	988	1033	+ 45	+ 4.6	48
1960	943	744	—199	—21.1	54
1961	1120	1212	+ 92	+ 8.2	27
1962	1369	1306	— 63	— 4.6	9
1963	664	687	+ 23	+ 3.5	86
Средний	1112	1057	— 55	— 4.9	

П р и м е ч а н и е. Минус (—) обозначает понижение, а плюс (+) — повышение стока Волги в результате его регулирования водохранилищем.

Средний годовой приток в водохранилище в 1947—1963 гг. был равен 35.1 км³, что соответствует расходу 1112 м³/сек. Объем сброса из него составлял в среднем 33.3 км³ в год при среднегодовом расходе воды 1057 м³/сек. Последняя величина от года к году изменялась в пределах от 687 до 1447 м³/сек. Хотя колебания среднегодовых расходов воды Рыбинского гидроузла в общих чертах повторяют ход притока в водохранилище, влияние этого водоема на годовой сток Волги оказалось более значительным, чем это предполагалось в начальный период его существования. Изменение стока за счет аккумуляции вод в водохранилище и последующей их сработки в отдельные годы достигало 20% притока (табл. 3), причем увеличение стока наблюдалось не только в годы пониженной водности (1949, 1954, 1963), но и в годы, по водности близкие к среднему многолетнему стоку (1951, 1959), и даже в многоводные годы (1957, 1961). Понижение стока Волги водохранилищем отмечалось не только в многоводные, но и в средние по водности годы (1948, 1960). Такой характер регулирования способствовал не уменьшению колебаний годового стока Волги, а некоторому его увеличению. Коэффициент изменчивости C_p среднегодовых расходов притока в Рыбинское водохранилище за 1947—1963 гг. равен 0.21, а C_p стока из него за этот же период 0.23.

Изучение водных масс Горьковского водохранилища производилось в годы различной водности. Обеспеченность годового объема сброса волжских вод в водоем в 1961 г. соответствовала примерно 20%, в многовод-

ном 1962 г. 10% и в маловодном 1963 г. менее 85%; обеспеченность годового притока и стока определены по соответствующим кривым для многолетнего периода, приведенным в работе Р. Ф. Бюрига (1950).

Внутригодовой режим поступления воижских вод из Рыбинского водохранилища в Горьковское отличается значительным постоянством месячного стока, объем которого колеблется в среднем в пределах от 6 до 10% годовой величины (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Внутригодовое распределение стока в створе Рыбинского гидроузла
(в % от годового сброса)

Годы	Месяцы											
	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	II	III
Среднее за 1947—1964	5.9	8.3	8.6	7.8	7.7	7.8	8.5	8.5	9.8	9.7	9.6	7.8
1961—1962	5.3	14.4	7.7	6.4	7.5	7.9	8.2	7.1	8.9	7.4	8.9	10.0
1962—1963	7.9	7.5	8.6	9.8	10.2	6.9	7.8	7.9	10.1	10.9	6.2	6.1
1963—1964	7.1	5.1	9.2	8.1	11.3	10.6	7.6	8.5	11.1	9.0	6.0	7.4

Минимальные месячные сбросы воды из Рыбинского водохранилища производятся, как правило, весной в период его наполнения; при этом средние расходы воды за апрель и май в маловодные годы (в том числе и в 1963 г.) сокращаются до 400—500 м³/сек. В летние и осенние месяцы сбросы обычно постепенно увеличиваются и достигают максимума зимой, когда они нередко превышают 1500, а иногда и 1800 м³/сек. В отдельные годы имели место значительные отклонения величин месячного стока от среднего его внутригодового распределения, вызванные гидрометеорологическими особенностями года и режимом работы ГЭС. Так, в 1961 г. максимальный месячный объем воды был сброшен через гидроузел в мае, что характерно для лет с высоким весенним половодьем. В 1962 г., отличавшемся очень высоким летним стоком, наибольший из среднемесячных расходов воды наблюдался в августе.

Регулирование стока Рыбинским водохранилищем проявляется не только в характерном для него сезонном и годовом перераспределении сбрасываемых в нижний бьеф объемов воды, но и существенном внутригодовом выравнивании физических и химических их свойств. Исследования Н. В. Буторина (1965в) показали, что в сбросном плесе этого водохранилища в течение всего года находится водная масса центральной части водоема, размах годового варьирования характеристик которой относительно невелик (табл. 5).

Т а б л и ц а 5

Некоторые характеристики водной массы центральной части
Рыбинского водохранилища (по Н. В. Буторину, 1965в)

Показатели	Весна	Лето	Осень	Зима
Электропроводность, мксим./см	211—272	163—172	159—161	164—243
Содержание гидрокарбонатов, мг-экв./л	1.80—2.42	1.41—1.49	1.30—1.42	1.34—1.94
Жесткость, мг-экв./л	2.06—2.73	1.96—2.49	1.88—2.19	1.82—2.90
Цветность, град.	20—40	15—25	30—35	25—40
Прозрачность, см	150—180	170—190	110	—

Волжская водная масса Горьковского водохранилища, образующаяся преимущественно из этих вод, наследует их основные физико-химические свойства и особенности. Вследствие интенсивного перемешивания в водоемах и нижнем бьефе Рыбинского гидроузла она поступает в водоем полностью однородным по всему сечению потоком. Ряд характеристик этой водной массы, определенных нами у Рыбинска, приведен в табл. 6. Из данных таблицы видно, что электропроводность Волжской водной массы менялась в сравнительно небольшом диапазоне (133—237 мксим./см).

Таблица 6

Характеристики Волжской водной массы у Рыбинска

Дата	Температура, °C	Прозрач- ность, см	Электропро- водность, мксим./см	Содержание гидрокарбо- натов, мг-экв./л	Жесткость, мг-экв./л	Цветность, град.	pH
1961							
11 VII	18.0	80	162	—	—	55	—
23 VII	20.0	110	158	—	—	50	—
31 VII	21.0	95	157	—	—	35	—
29 VIII	15.9	—	157	—	—	—	—
1962							
15 VI	14.1	—	194	1.54	1.80	65	7.8
18 VII	18.5	110	147	1.25	1.62	45	7.8
10 VIII	16.6	—	145	—	—	—	—
28 VIII	14.7	100	139	1.13	1.51	55	7.6
14 IX	11.4	90	133	0.83	1.46	—	—
17 X	5.1	40	149	1.15	1.58	58	7.4
1963							
2 II	0.0	—	196	—	—	80	7.0
27 III	0.0	—	205	—	—	85	6.9
3 V	6.4	—	204	—	—	55	7.0
16 V	10.0	110	237	2.16	2.51	40	—
30 V	15.6	80	202	—	—	35	7.6
12 VII	17.0	60	147	—	—	45	7.4
24 VII	19.4	—	194	—	—	60	7.6
21 VIII	17.9	90	154	—	—	—	—
4 IX	19.5	—	166	—	—	55	—

Соответственно невелики здесь были колебания в содержании гидрокарбонатов и жесткости. Цветность вод составляла 35—60°; интенсивная их окрашенность зимой 1963 г. вообще не характерна для Волжской водной массы, в 1963 г. она была связана, по-видимому, с исключительно высоким осенним стоком предшествующего года. Прозрачность воды у Рыбинска колебалась в пределах 80—110 см и только в периоды штормов на Рыбинском водохранилище уменьшалась до 40—60 см. Характерная для Волжской водной массы небольшая изменчивость показателей подтверждается химическими анализами воды у Ярославля (табл. 7), приведенными в работе А. А. Зенина (1964). Так, значения общей минерализации состава воды колеблются в пределах 86.6—147.8 мг/л.

Помимо пониженной внутригодовой изменчивости физических и химических характеристик, Волжская водная масса отличается заметным запаздыванием экстремальных значений показателей по сравнению с бытовыми условиями стока. Наибольшие значения ее электропроводности, щелочности и жесткости наблюдаются весной, а минимальные — в летне-осенний период (табл. 5 и 6). Исключение составляют годы с очень высоким половодьем, когда к Рыбинской ГЭС могут поступать трансформированные мало минерализованные весенние воды Верхней Волги (Ершова, 1965). В этих случаях минерализация и электропроводность воды Волжской водной массы Горьковского водохранилища в мае могут резко уменьшаться по сравнению с величинами, приведенными в табл. 6.

Заметно отличается рассматриваемая водная масса от остальных исходных масс по температуре, особенно весной, когда она значительно холоднее вод боковой приточности (табл. 8).

Т а б л и ц а 7
Пределы колебаний ионного состава воды у Ярославля (1956—1958 гг.)

Ионы	% экв.
Ca ⁺⁺	29.7—35.5
Mg ⁺⁺	12.2—16.4
Na ⁺ +K ⁺	2.1—8.1
HCO ₃ [']	37.7—41.3
SO ₄ [']	6.7—19.1
Cl [']	2.4—3.4

Таким образом, Волжская водная масса, составляющая в среднем около 64% общего годового притока в Горьковское водохранилище, характеризуется большой равномерностью распределения месячного и сезонного стока и малой изменчивостью большинства своих физических и химических показателей. В весенний период — это относительно холодные и высоко минерализованные воды, составляющие в среднем около 30% общего притока в водохранилище. В летне-осенний период Волжская водная масса представляет

70—80% общего притока в водоем, ее минерализация и цветность имеют наименьшие в году значения. Зимой относительное значение этой вод-

Т а б л и ц а 8

Среднемесячная температура воды (° С) Волжской водной массы у Рыбинска и вод некоторых притоков речной части Горьковского водохранилища в весенний период

Водомерный пост	1961		1962		1963
	IV	V	IV	V	V
Горьковское водохранилище—Рыбинск	1.2	5.4	1.6	8.3	9.8
р. Черемуха—д. Дмитриевка	—	11.5	3.9	12.8	15.6
р. Урдома—д. Белятино	—	10.9	—	13.0	15.4
р. Ить—д. Нестерово	1.2	11.5	3.4	13.3	16.1
р. Которосль—г. Гаврилов-Ям	—	12.0	4.5	13.6	17.1

ной массы в приходной части водного баланса водохранилища достигает 88—90%, ее минерализация и окрашенность в этот период постепенно возрастают.

ВОДНЫЕ МАССЫ ПРИТОКОВ

В Горьковское водохранилище впадает большое число рек, собирающих сток с водосбора площадью около 79 тыс. км². Этот водосбор представляет собой слабо всхолмленную равнину, для которой характерно чередование вытянутых с юго-запада на северо-восток невысоких, расчлененных долинами рек возвышенностей с высотами в среднем 150—170 м абс. и плоских, заболоченных низин. Крупнейшими притоками водоема являются Унжа и Кострома, бассейны которых занимают в сумме более половины площади водосбора. Кроме этих рек, наиболее значительны Которосль, Немда и Мера. Притоки водохранилища — преимущественно снегового питания. Несмотря на то что соотношение объемов вод различного генезиса меняется в довольно широком диапазоне, доля талого стока в них превышает долю подземного и дождевого стока. По характеру водного режима притоки водохранилища относятся к восточноевропейскому типу рек с высоким весенним половодьем и умеренно низкой меженью в остальные сезоны, нарушаемой в летне-осенний период дождевыми паводками.

Суммарный сток рек, впадающих в водохранилище, составляет в среднем около 36% приходной части годового водного баланса водоема. Роль боковой приточности в формировании водной массы водохранилища в различные сезоны колеблется в широких пределах. Весной реки дают в среднем 60—80% общего притока в водоем, а в период прохождения по ним максимальных расходов половодья — до 94% (Кавчук и Ярославцев, 1964). В летне-осенний период участие речных вод в водообмене водо-

Таблица 9

Соотношение объемов водных масс, поступающих в Горьковское водохранилище в 1957—1963 гг.

	Весенний приток				Летне-осенний приток				Зимний приток				Годовой приток			
	средний за период		пределы колебаний в отдельные годы, в % от общего притока		средний за период		пределы колебаний в отдельные годы, в % от общего притока		средний за период		пределы колебаний в отдельные годы, в % от общего притока		средний за период		пределы колебаний в отдельные годы, в % от общего притока	
	км³	%	км³	%	км³	%	км³	%	км³	%	км³	%	км³	%	км³	%
Водные массы																
Волжская	5.51	31	23—39	16.44	75	68—82	13.13	88	84—90	35.08	64	61—66				
Унжи	4.57	25	22—28	2.47	10	7—13	0.61	4	4—5	7.35	13	12—15				
Костромы	2.97	17	15—18	1.22	6	4—8	0.35	2	2—3	4.54	8	8—9				
Которосли	0.73	4	3—6	0.40	2	1—3	0.17	1	1—2	1.30	3	2—3				
Немды	0.72	4	3—5	0.32	1	1—2	0.12	1	0.5—1	1.16	2	1—2				
Меры	0.60	3	3—4	0.21	1	0.5—1	0.08	1	0.5—1	0.89	2	1—2				
Прочих рек	2.82	16	—	1.11	5	—	0.47	3	—	4.40	8	—				
Общий приток в водохранилище	17.92	100	—	21.87	100	—	14.93	100	—	54.72	100	—				

хранилища уменьшается примерно вдвое по сравнению с весенним периодом, а зимой доля речного притока сокращается до 10—16%. В табл. 9 приведены средние величины объемов годового и сезонных стоков наиболее крупных притоков водохранилища за 1957—1963 гг. Учитывая особенности внутригодового распределения стока рек бассейна водохранилища (рис. 2), к весеннему периоду отнесены апрель и май, в течение которых на всех этих реках проходит половодье. Летне-осенний период, с июня по ноябрь, характеризуется сравнительно невысоким стоком, на который накладываются дождевые паводки. Зима, с декабря по март, отличается низким и устойчивым стоком рек. Приведенные в табл. 9 объемы стока притоков рассчитаны для их полных водосборов по методике, применяемой в Волжской гидрометеорологической обсерватории с 1961 г. при расчете водного баланса Горьковского водохранилища (Кавчук и Ярославцев, 1964).

Как видно из табл. 9, наибольшие объемы из речных водных масс имеют Унжа и Кострома, сток которых составляет в среднем 13 и 8% общего годового и 25 и 17% весеннего притока в водохранилище. Объем каждой из остальных речных водных масс — менее 5% общего притока в водоем в любое время года. Следует отметить относительно большую устойчивость соотношения объемов отдельных исходных водных масс от года к году и при сравнении сезонов различных лет. Удельный вес каждой из них в водообмене водохранилища в зависимости от гидрометеорологических условий отдельных лет меняется всего в пределах нескольких процентов от общего притока воды в водоем. Следовательно, степень участия каждой из исходных водных масс в формировании водной массы водохранилища относительно постоянна в различные по водности годы, что может быть объяснено общностью климатических и орографических условий формирования стока в бассейне водохранилища. К подобному выводу пришел и Н. В. Буторин (1965в), установивший постоянство соотношения притока воды по Волге, Шексне и Мологе к Рыбинскому водохранилищу, не зависящего от водности года.

Весеннее половодье на всех притоках водохранилища начинается приблизительно одновременно. Максимальные весенние расходы в устьях малых рек совпадают с началом интенсивного подъема уровня в водохранилище, а спад половодья происходит еще до момента наполнения водоема до НППГ (рис. 2). Максимальные расходы рек Унжи и Костромы в 1961 г. имели место уже после наполнения водохранилища до НППГ, в то время как в 1962 и 1963 гг. максимум стока этих рек прошел в период подъема уровня водоема, и только воды конца их половодья поступали в уже заполненное водохранилище. Соотношение времени прохождения пика половодья отдельных притоков и положение уровня в водоеме в этот момент играет важную роль в распределении водных масс в водохранилище, их динамике и трансформации.

Втеkanie речных вод в водохранилище можно рассматривать как процесс непрерывного поступления в водоем через входной створ водной массы, комплекс физических и химических свойств которой меняется в течение года в определенных пределах. Диапазон изменения этих свойств водной массы каждого из притоков, ее специфические особенности определяются физико-географическими условиями формирования стока на водосборе и процессами трансформации вод в русле реки. В соответствии с периодически меняющимся соотношением основных генетических категорий вод — поверхностно-склоновых, почвенно-грунтовых и грунтовых (Воронков, 1963) — свойства проходящей через входной створ речной водной массы изменяются во времени: за одним объемом воды с некоторым комплексом характеристик поступает следующий с иными значениями показателей. Таким образом, водная масса реки складывается из непрерывно

чередующихся разнокачественных объемов вод, которые можно рассматривать как отдельные модификации речной водной массы: воды половодья, воды летне-осенней межени, воды дождевого паводка и воды зим-

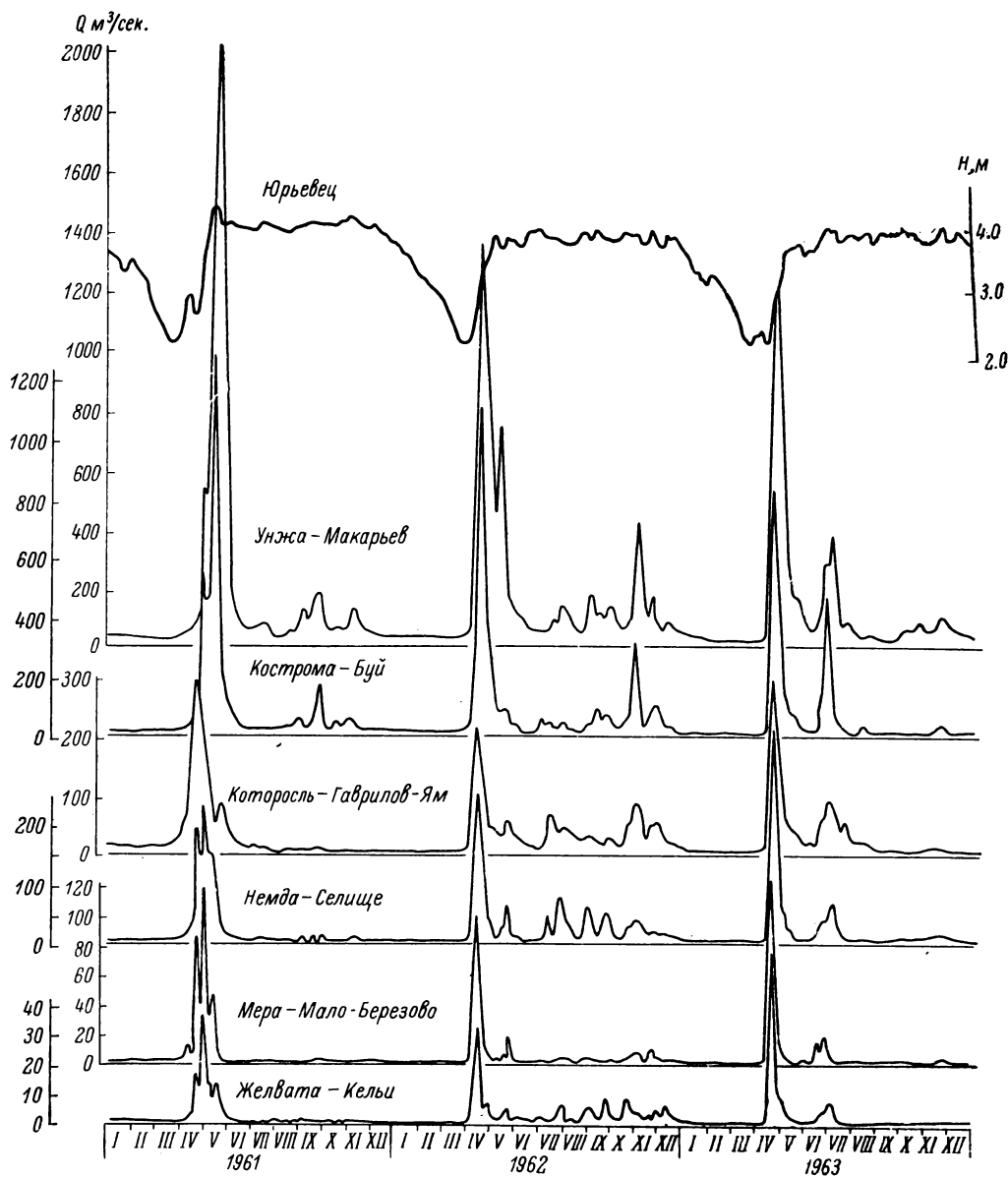


Рис. 2. Гидрографы основных притоков Горьковского водохранилища и колебания его уровня у Юрьевца.

ней межени. Особенно ярко выражено чередование отдельных модификаций в водных массах малых рек, бассейны которых наиболее близки к «элементарным водосборам» в понимании П. П. Воронкова. В водных массах крупных притоков водохранилища, таких как Унжа и Кострома, границы между отдельными модификациями расплывчаты.

Воды притоков водохранилища являются мало минерализованными и относятся к кальциевой группе гидрокарбонатного класса природных

вод. О пределах колебания общей минерализации и относительного химического состава вод основных притоков водоема можно судить по данным А. А. Зенина (1965), приведенным в табл. 10. Между расходами воды в реках бассейна водохранилища и ее общей минерализацией, а также концентрацией отдельных химических ингредиентов установлена достаточно тесная связь (Галактионова, 1964). В половодье минерализация воды, очень низкая по абсолютной величине, меняется незначительно, в то время как в межень относительно высокая концентрация ионов резко реагирует даже на небольшие изменения расходов воды.

Т а б л и ц а 10

Пределы колебания общей минерализации и ионного состава воды основных притоков Горьковского водохранилища

	Унжа	Кострома	Которосль	Немда
Общая минерализация, мг/л	43.8—184.8	74.8—308.8	138.9—385.1	40.6—156.2
Ионы, % экв.:				
Ca ⁺⁺	27.1—37.8	23.7—33.0	20.8—32.2	28.3—33.0
Mg ⁺⁺	9.6—16.3	14.1—18.5	11.7—21.9	13.0—15.0
Na ⁺ +K ⁺	1.5—6.8	0.3—11.6	2.4—10.4	3.1—7.2
HCO ₃ [']	31.3—41.0	36.4—43.5	38.0—44.2	33.7—47.3
SO ₄ [']	5.6—13.4	4.3—7.5	4.3—8.7	1.8—15.0
Cl [']	2.1—6.5	2.1—4.5	0.4—5.0	2.7—5.1

По физическим и химическим свойствам воды притоки водохранилища, на которых производились наблюдения, делятся на две группы, резко различающиеся между собой, особенно в летне-осенний период. Представителями первой группы рек, воды которых относительно высокоминерализованы и слабоокрашены, являются Унжа, Кострома и Мера; второй — с маломинерализованными и цветными водами — Немда, Желвата и Моча. В табл. 11 сведены величины показателей речных водных масс, поступавших в водохранилище в различные фазы гидрологического режима его притоков. Речные воды во входных створах были, как правило, однородны по всему сечению потока, поскольку в этих пунктах всегда наблюдалось речное течение.

Минимальная минерализация вод притоков водохранилища наблюдается весной, во время половодья. Электропроводность вод Унжи в этот период понижается до 50—60, а Немды — до 30 мксим./см. В это же время были отмечены и минимальные значения pH — на Унже 6.4, на Немде 6.0. Близки к приведенным величинам и показатели водной массы Елнати во время ее половодья. На других реках в ранневесенний период наблюдений не производилось. По материалам съемки водохранилища 3—4 мая 1963 г. можно предполагать, что водная масса половодья Костромы имела электропроводность около 80 мксим./см, pH не более 6.6 и цветность выше 60°. Весенние речные воды сильно отличаются от Волжской водной массы и водной массы водохранилища по температуре: они на 2—3° теплее последних.

Во время летне-осенней межени электропроводность вод рек первой группы возрастает до 250—320 мксим./см, содержание гидрокарбонатов и общая жесткость — до 2.0—3.0 мг-экв./л, а цветность уменьшается до 20—40°. Низкая цветность и малая мутность (2—5 мг/л) определяют относительно большую прозрачность этих вод (120—155 см). Электропроводность воды рек второй группы составляет 120—180 мксим./см,

Характеристики речных водных масс

Место отбора проб	Дата	Температура, °C	Прозрачность, см	Электропроводность, мксм/см	Содержание гидрокарбонатов, мг-экв./л	Жесткость, мг-экв./л	Цветность, град.	pH	Фаза гидрологического режима реки
Которосль у Ярославского автодорожного моста	18 VII 1962	20.6	40	207	2.06	2.35	65	7.3	Паводок
	29 VIII 1962	14.0	90	292	2.94	3.32	35	7.9	Спад паводка
	18 X 1962	4.0	120	374	3.84	3.96	32	—	Летне-осенняя межень
	3 II 1963	0.0	—	521	—	—	18	7.0	Зимняя межень
	27 III 1963	0.0	—	546	—	—	25	7.0	»
	16 V 1963	17.5	80	278	2.30	2.62	30	7.9	Спад половодья
Кострома	27 VI 1963	16.9	70	202	—	—	60	7.4	Паводок
	2 VIII 1962	17.8	100	216	1.75	2.38	70	8.0	Спад паводка
	29 VIII 1962	15.4	110	303	2.92	3.56	55	7.9	Летне-осенняя межень
	19 X 1962	4.6	80	287	2.78	3.07	82	7.8	Подъем паводка
у устья Мезы	17 V 1963	16.8	80	150	1.32	1.73	80	7.4	Спад половодья
	28 VI 1963	17.2	70	179	—	—	120	7.3	Паводок
Мера	29 VI 1961	20.5	135	318	—	—	35	—	Летне-осенняя межень
	18 VI 1962	16.6	145	326	3.37	3.17	22	7.6	»
	19 VII 1962	21.6	40	433	2.03	2.14	60	7.2	Паводок
	31 VIII 1962	13.7	30	178	1.70	2.13	60	7.8	»
	20 X 1962	1.8	110	280	3.09	3.07	38	7.9	Подъем паводка

Таблица 11 (продолжение)

Место отбора проб	Дата	Темпера- тура, °C	Прозрач- ность, см	Электро- провод- ность, мксм/см	Содержа- ние гидрокар- бонатов, мг-экв./л	Жест- кость, мг-экв./л	Цвет- ность, град.	рН	Фаза гидрологического режима реки
у Долматова	{ 9 II 1963 1 IV 1963	0.0 0.0	— —	320 323	— —	— —	10 15	6.9 6.9	Зимняя межень »
у Павлихи	{ 18 V 1963 30 VI 1963	17.3 19.2	90 30	201 122	1.92 —	2.33 —	45 100	7.2 6.9	Спад половодья Паводок
Желвата									
у устья Кондомы	{ 30 VI 1961 18 VI 1962	21.9 17.1	60 80	124 118	— 0.90	— 1.07	105 108	— 7.2	Спад паводка »
у устья Надоги	{ 20 VII 1962 1 IX 1962 21 X 1962	20.6 12.8 1.1	110 50 40	144 53 68	1.18 0.24 0.29	1.44 0.65 0.72	65 170 120	7.3 6.8 7.2	Летне-осенняя межень Паводок »
у Дымницы	{ 4 II 1963 28 III 1963	0.0 0.0	— —	129 155	— —	— —	30 30	6.8 7.0	Зимняя межень »
у устья Надоги	{ 19 V 1963 1 VII 1963	16.9 20.0	90 100	66 100	0.45 —	0.91 —	65 75	6.6 7.2	Спад половодья Паводок
Елнать									
у Костяева	1 IX 1962	13.9	30	137	1.09	1.50	40	7.4	»
у автодорожного моста	{ 10 II 1963 2 IV 1963 26 IV 1963 1 VII 1961	0.1 0.4 — 20.3	— — — —	242 258 58 174	— — — —	— — — —	40 30 65 60	6.8 6.8 6.6 —	Зимняя межень » Половодье Летне-осенняя межень

Т а б л и ц а 11 (продолжение)

Место отбора проб	Дата	Темпера- тура, °C	Прозрач- ность, см	Электро- провод- ность, мксм/см	Содержа- ние гидро- карбона- тов, мг-экв./л	Жест- кость, мг-экв./л	Цвет- ность, град.	рН	Фаза гидрологического режима реки
Немда у Ново-Березовца	{ 19 VI 1962 20 VII 1962 2 IX 1962 21 X 1962 6 II 1963 1 IV 1963	16.9	80	162	1.45	1.47	73	7.2	Летне-осенняя межень
		20.2	60	98	0.80	1.06	150	6.9	Паводок
		13.3	30	71	0.50	0.84	150	7.0	»
		1.2	70	110	0.56	1.22	144	6.9	»
		0.0	—	190	—	—	30	6.8	Зимняя межень
у Завражъя	{ 27 IV 1963	0.0	—	204	—	—	20	6.6	»
		0.2	—	30	—	—	80	6.0	Половодье
		18.7	70	80	0.69	0.90	100	6.7	Спад половодья
у Ново-Березовца	{ 19 V 1963 1 VII 1963	18.8	50	83	—	—	120	6.8	Паводок
Унжа у Николо-Макарова	{ 2 VII 1961 20 VI 1962 22 VII 1962 3 IX 1962 22 X 1962	20.0	155	250	—	—	40	—	Летне-осенняя межень
		17.5	110	227	1.75	2.02	47	7.2	Конец спада половодья
		20.0	70	202	1.79	2.17	80	7.4	Подъем паводка
		13.3	70	150	1.14	1.68	110	7.7	Паводок
		1.1	80	187	1.13	2.04	100	7.7	Спад паводка
у Красногорья	{ 6 II 1963 29 III 1963	0.0	—	319	—	—	20	7.1	Зимняя межень
		0.0	—	350	—	—	25	6.4	»

общая жесткость и щелочность характеризуется величинами, не превышающими 1.5 мг-экв/л, а их цветность достигает 80—100°. В соответствии с этим и прозрачность этих вод всего 60—80 см.

В периоды дождевых паводков содержание основных ионов и электропроводность в речных водах резко понижаются, а их окрашенность возрастает. На реках первой группы максимальные значения цветности во время дождевых паводков составляли около 120°, на реках второй группы они достигали 180—190°. В водах паводков содержится очень большое количество взвесей. Из-за высокой цветности и мутности дождевые воды на реках имели буро-коричневый, буро-желтый и даже желтый цвет, а их прозрачность понижалась до 30—40 см.

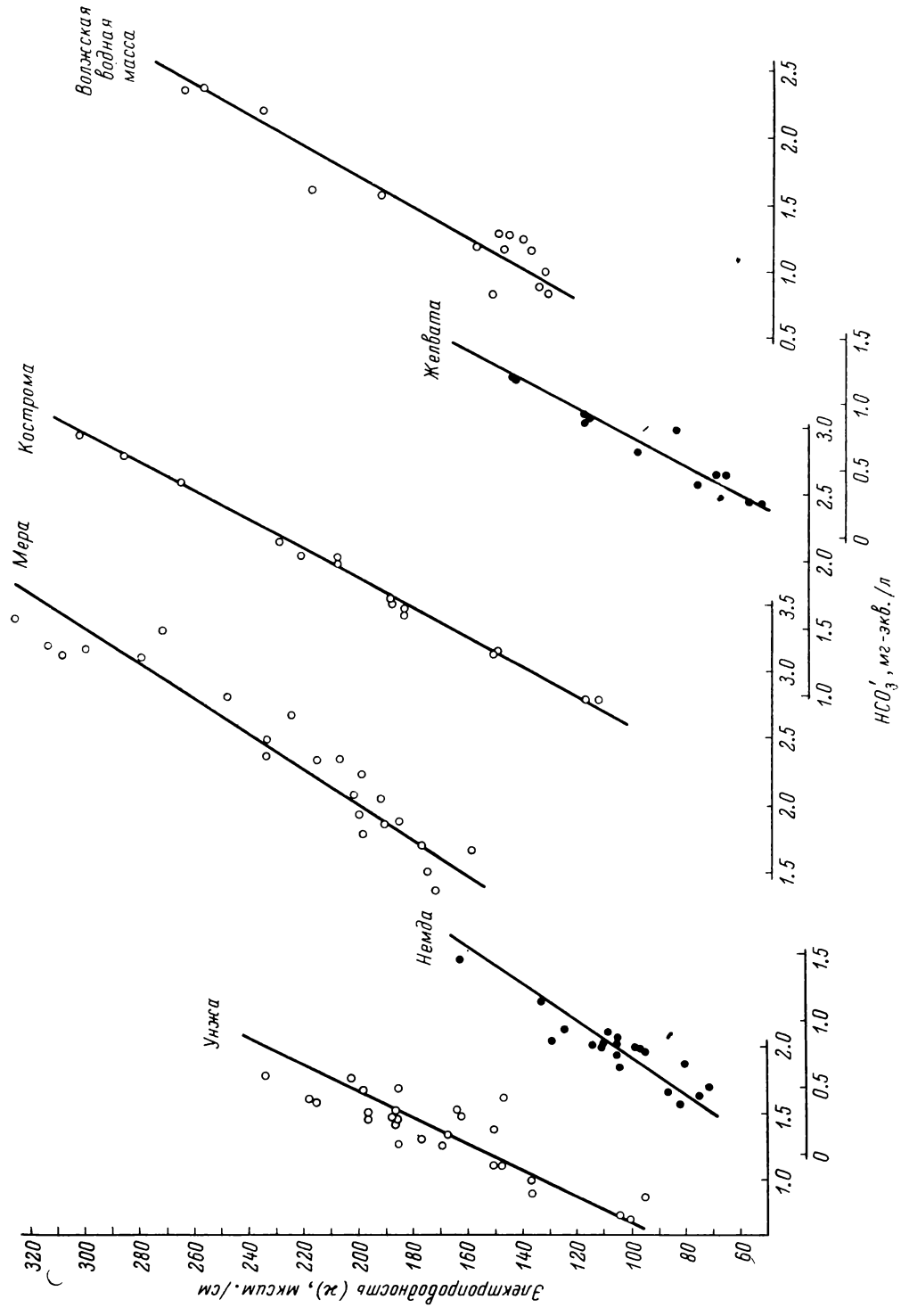
Зимой электропроводность и минерализация достигают максимальных значений (табл. 11). Различия вод рек по цветности менее заметны, так как окрашенность воды в это время минимальная.

Различия рассмотренных рек по физическим и химическим свойствам их вод — высокоминерализованных и «светлых» и низкоминерализованных и цветных — очень контрастны, что было отмечено еще А. Ф. Никитиным (1905). Эти два типа рек различаются и по модулю стока: среднегодовой модуль стока первой группы за период 1957—1963 гг. составляет 8.1—8.6, рек второй группы 7.3—7.5 л/сек.·км². Соответственно различаются эти группы рек и по весенним модулям стока. Отмеченные различия притоков водохранилища по стоку, и особенно по физическим и химическим характеристикам их вод, объясняются физико-географическими особенностями бассейнов этих рек. Очагами формирования стока рек первой группы являются возвышенности, где речная сеть глубоко прервана и дренирует несколько горизонтов грунтовых вод. Бассейны рек второй группы отличаются повышенной заболоченностью и лесистостью по сравнению с водосборами рек первой группы.

Между отдельными показателями исходных водных масс могут быть установлены коррелятивные связи. Наиболее тесная зависимость наблюдается между электропроводностью, содержанием гидрокарбонатов и общей жесткостью (рис. 3 и 4). Связь между этими показателями может быть охарактеризована линейным уравнением. Коэффициенты корреляции, угловые коэффициенты регрессии и значения свободных членов этих уравнений для ряда водных масс сведены в табл. 12. Высокий коэффициент корреляции (0.90 и выше) этих связей вполне закономерен, поскольку ионы HCO_3^- , Ca^{++} и Mg^{++} являются преобладающими в природных водах рассматриваемого района. Весьма высокие значения коэффициента корреляции между концентрацией HCO_3^- и $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$ и электропроводностью воды указывают на относительно большую стабильность карбонатно-кальциевого равновесия в исходных водных массах Горьковского водохранилища. Приведенные уравнения можно использовать как для контроля отдельных гидрохимических определений, так и для ориентировочного расчета значений одного показателя по известной величине другого.

Закономерного изменения параметров уравнений регрессии от реки к реке, связанного со спецификой физико-химического их облика, установить не удалось. По-видимому, различия этих параметров несущественны. Они могут быть вызваны ошибками гидрохимических определений, а также недостаточно большим числом коррелируемых членов ряда. Однотипность этих уравнений свидетельствует об относительно однородном химическом составе вод рассматриваемых нами рек. Именно поэтому А. А. Зенину (1961) удалось установить единую зависимость между электропроводностью и общей минерализацией воды Волги и ее крупных притоков.

Для водных масс трех рек — Унжи, Немды и Меры — отмечено наличие коррелятивной связи между прозрачностью воды и ее электропровод-



{Рис. 3.
Зависимость электропроводности вод от содержания углекислоты в отдельных водных массах.

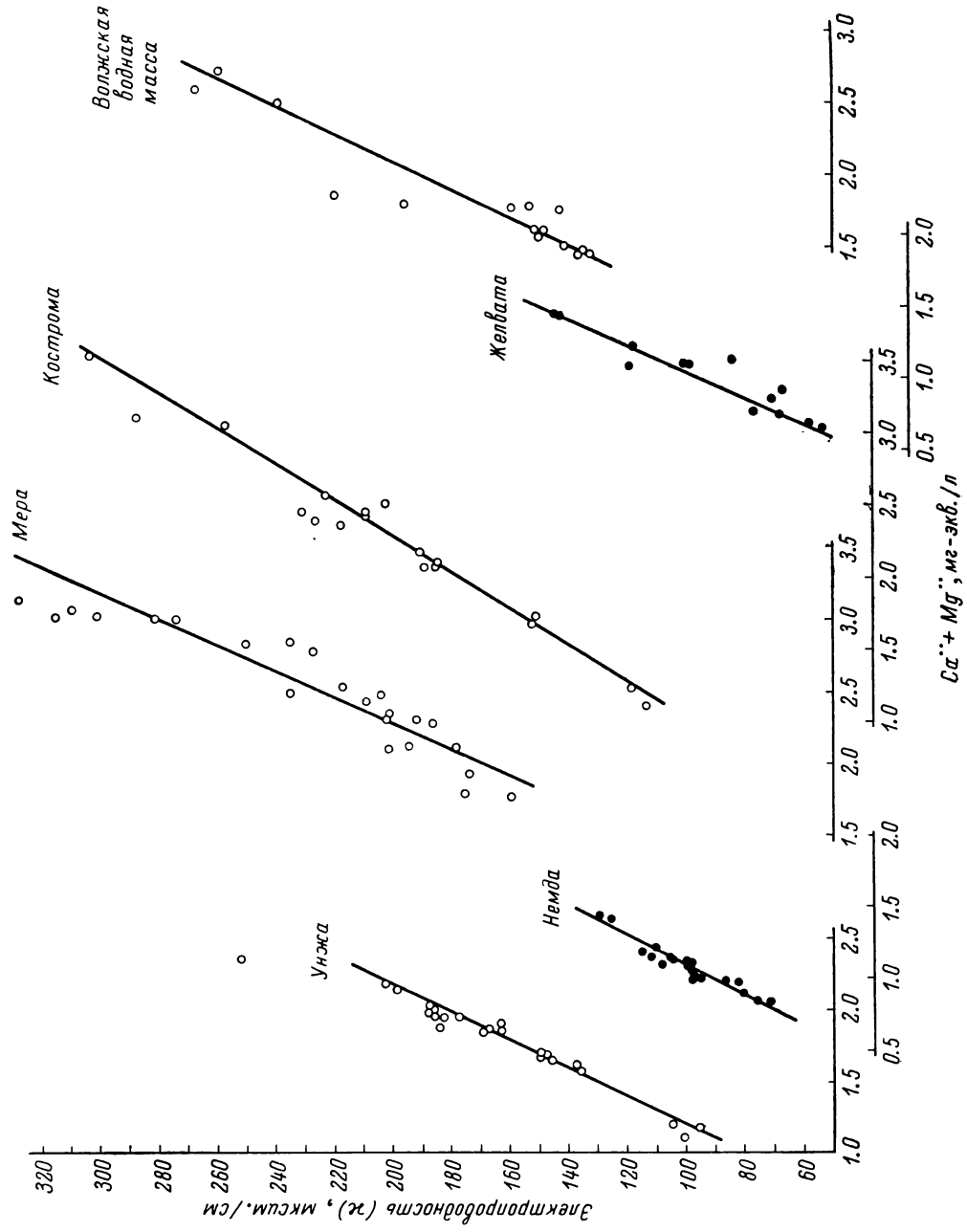


Рис. 4. Зависимость электропроводности от общей жесткости воды отдельных водных масс.

Т а б л и ц а 12

Зависимость электропроводности воды от содержания в ней ионов HCO_3^- и $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$

	$x = f(\text{HCO}_3^-)$				$x = f(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$			
	число членов ряда	коэффициент корреляции	параметры уравнения регрессии		число членов ряда	коэффициент корреляции	параметры уравнения регрессии	
			угловой коэффициент	свободный член			угловой коэффициент	свободный член
Водная масса								
Унжи	27	0.88 ± 0.03	100	30	22	0.99 ± 0.01	101	-19
Немды	20	0.90 ± 0.03	72	48	20	0.97 ± 0.01	96	-5
Меры	23	0.95 ± 0.01	75	52	23	0.94 ± 0.02	108	-17
Желваты	13	0.97 ± 0.01	93	33	13	0.93 ± 0.02	111	-47
Костромы	15	0.97 ± 0.01	93	28	18	0.98 ± 0.01	81	15
Воляжская на участке Рыбинск—Ярославль . . .	15	0.96 ± 0.01	89	52	15	0.95 ± 0.02	105	-20

ностью (рис. 5). Эта зависимость в отличие от рассмотренных выше не функциональная, имеющая химическую природу, а обусловлена особенностями формирования водной массы реки, т. е. связь стохастическая, географического порядка. В пределах наблюдавшихся величин эта зависимость может быть выражена линейным уравнением регрессии

$$P = ax + b,$$

где P — прозрачность, см, x — электропроводность, мксим./см. Параметры этих уравнений приведены в табл. 13.

Существование связи между этими показателями объясняется тем, что с изменением расхода воды в реке, например во время подъема дождевого паводка, уменьшается минерализация и электропроводность при одновременном увеличении мутности и цветности воды, что и приводит

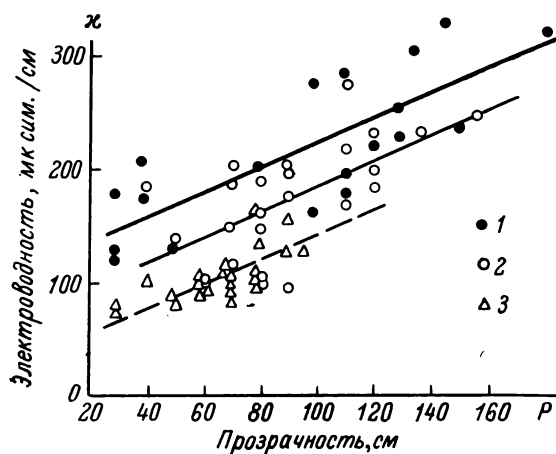


Рис. 5. Связь прозрачности и электропроводности вод Меры (1), Унжи (2) и Немды (3).

к уменьшению прозрачности водной массы. О влиянии на эту связь окрашенности воды говорит закономерное изменение свободного члена уравнения (при постоянном значении углового коэффициента) от Меры — реки, имеющей наименьшую цветность, к Немде, вода которой наиболее сильно окрашена органическими веществами. Из-за малочисленности материалов наблюдений подобные связи для водных масс других рек установить не представляется возможным.

Связи, обусловленные особенностями процесса формирования водных масс притоков водохранилища, имеются и между цветностью и электропроводностью речных вод (рис. 6). Они криволинейны и обратны, т. е. с увеличением значений одного показателя величина другого уменьшается.

Это объясняется тем, что с увеличением доли грунтового питания возрастает минерализация и электропроводность речной водной массы, а ее цветность уменьшается. На всех графиках, представленных на рис. 6, точки, характеризующие водную массу в момент подъема половодья,

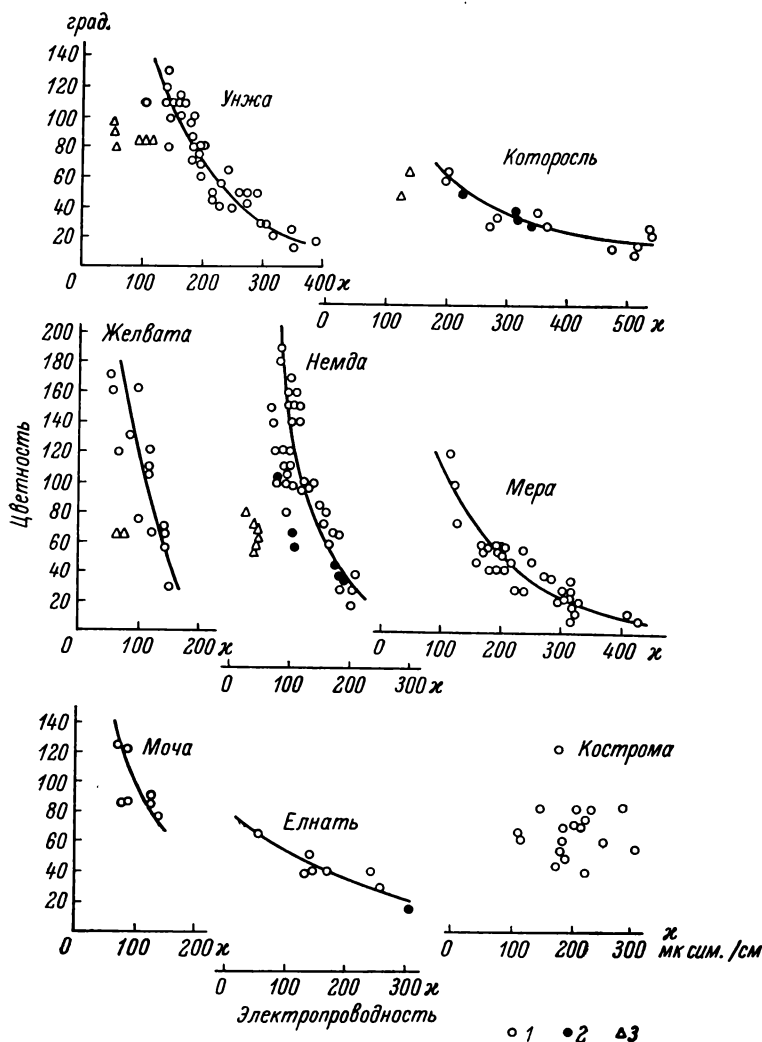


Рис. 6. Связь цветности и электропроводности отдельных водных масс.

1 — наблюдения в летне-осенний и зимний период; 2 — наблюдения постов Гидрометслужбы; 3 — наблюдения во время половодья.

обособляются в отдельные группы, лежащие левее общего для других периодов поля точек. Это скорее всего вызвано тем, что в начальный период снеготаяния весной почвы и болота бассейнов рек еще находятся в замерзшем состоянии. Вследствие этого воды начальной фазы половодья имеют пониженную окрашенность по сравнению со столь же мало минерализованными водами, формирующимися в бассейнах рек в поздневесенний период или во время дождевых паводков. Общий наклон кривых связи электропроводности и цветности и их изогнутость зависят от физико-географических особенностей бассейнов рек. Для простоты сравнения этих связей между собой мы рассчитали для них уравнения регрес-

Т а б л и ц а 13

Связь прозрачности и электропроводности
речных водных масс

	Число членов ряда	Коэффициент корреляции	Параметры уравнения регрессии	
			угловой коэффи- циент a	свобод- ный член b
Водная масса				
Меры	20	0.79 ± 0.06	0.9	—100
Унжи	25	0.62 ± 0.08	0.9	— 67
Немды	25	0.85 ± 0.04	0.9	— 28

Т а б л и ц а 14

Связь цветности и электропроводности
речных водных масс

	Число членов ряда	Коэффициент корреляции	Параметры уравнения регрессии	
			угловой коэффи- циент a	свобод- ный член b
Водная масса				
Которосли	15	-0.84 ± 0.05	—0.14	85
Меры	36	-0.87 ± 0.03	—0.36	132
Унжи	39	-0.91 ± 0.02	—0.53	174
Желваты	14	-0.86 ± 0.04	—0.91	198
Немды	22	-0.98 ± 0.01	—1.25	273

сии, условно заменив криволинейные связи прямолинейными. Из сопоставления параметров этих уравнений (табл. 14) видно, что по мере увеличения заболоченности и лесистости водосбора и уменьшения глубины вреза речной сети возрастают значения этих параметров, т. е. увеличивается крутизна связей. Для водных масс, трансформированных в условиях замедленного водообмена, подобных связей установить не удастся. Отсутствие связи электропроводности с цветностью характерно для Волжской водной массы, формирующейся в Рыбинском водохранилище, для вод Костромы и ее притоков, которые смешиваются и трансформируются в Костромском расширении (рис. 6), и т. д. Эти факты указывают на происходящее в водоемах замедленного водообмена смешение вод различного генезиса и изменение первоначальной окрашенности в процессе их трансформации.

РАЗМЕЩЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ВОДНЫХ МАСС В ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Исходные водные массы, поступающие в водохранилище, некоторое время сохраняют присущие им свойства и особенности, благодаря чему по ряду наиболее репрезентативных показателей удастся установить их размещение в пределах водоема. Вместе с тем в результате процессов

трансформации этих масс, их смешения в определенные периоды в водохранилище возникает новая водная масса, отличающаяся от исходных водных масс по целому ряду своих свойств.

Рассмотрим наиболее характерные для Горьковского водохранилища типы размещения водных масс, исходных и его собственной, в различные сезоны года. За начало гидрологической весны на водоеме принят момент поступления в водохранилище первых порций вод половодья его притоков. Начало летне-осеннего сезона наступает тогда, когда из водохранилища в основном вытесняются либо полностью трансформируются в нем воды весеннего речного половодья. Начало зимы совпадает с моментом перехода рек на исключительно грунтовое питание и установления на водохранилище ледяного покрова. Длительность гидрологических сезонов несколько меняется, что связано с особенностями гидрометеорологических условий каждого года.

Весенний период

Об основных чертах размещения водных масс в начальный момент весеннего наполнения водохранилища дают представление материалы пятнадцатой съемки (табл. 4). Поскольку гидрологические наблюдения производились с ледакола, данные по температуре, электропроводности, цветности и pH характеризуют лишь воды на двух основных судоходных трассах водохранилища — от шлюзов Горьковского гидроузла до Рыбинска и от Юрьевца до Кобылина в Унженском заливе. Используя наблюдения со льда в стороне от этих трасс, можно построить, хотя и далеко не полные, схемы распределения перечисленных показателей водных масс в пределах озерной части водохранилища (рис. 7).

В начале съемки приплотинная часть водоема южнее пос. Сокольского была занята однородными зимними водами волжского происхождения. У восточного берега водоема севернее Сокольского было обнаружено небольшое по объему пятно трансформированных зимних унженских вод. В нижней половине пятиметровой вертикали они имели температуру 0.2° и электропроводность 252 мксим./см. По мере приближения к нижней кромке льда электропроводность падала до 217 мксим./см, а температура до 0.0° из-за просачивающихся под лед талых вод. Горизонтальный градиент электропроводности во фронтальной зоне между зимними водами Унжи и водами водохранилища составлял около 85 мксим./см на 1 км. Надрусловый участок водоема севернее Сокольского занимали зимние волжские воды, сильно трансформированные за счет смешения с водами половодья малых притоков речной части водохранилища. Пойменный участок Юрьевоцкого расширения был заполнен водами половодья рек Унжи и Немды, значения показателей которых приведены в табл. 11. Отсюда они распространялись к югу, языком вклиниваясь в центральную часть плеса водохранилища, расположенного к северу от Сокольского. В этом районе трансформированные весенние воды Унжи имели электропроводность 126—128 мксим./см и цветность 50—52°. Восточное крыло фронта вод Унженского половодья являлось их границей с зимними речными водами, а западное разделяло весенние воды Унжи и сильно трансформированную Волжскую водную массу. Еще менее минерализованные, чем унженские, воды половодья Немды занимали северную часть Юрьевоцкого расширения. Отсюда они узкой струей шли на юг вдоль затопленной бровки русла Волги, разделяя Волжскую и Унженскую водные массы. На границе волжских вод и вод Немды у Юрьевца наблюдался самый большой из встречавшихся нами на Горьковском водохранилище горизонтальный градиент электропроводности — 160 мксим./см на 1 км.

К концу съемки положение водных масс изменилось, но значения основных их показателей остались близкими к приведенным выше. Приплотин-

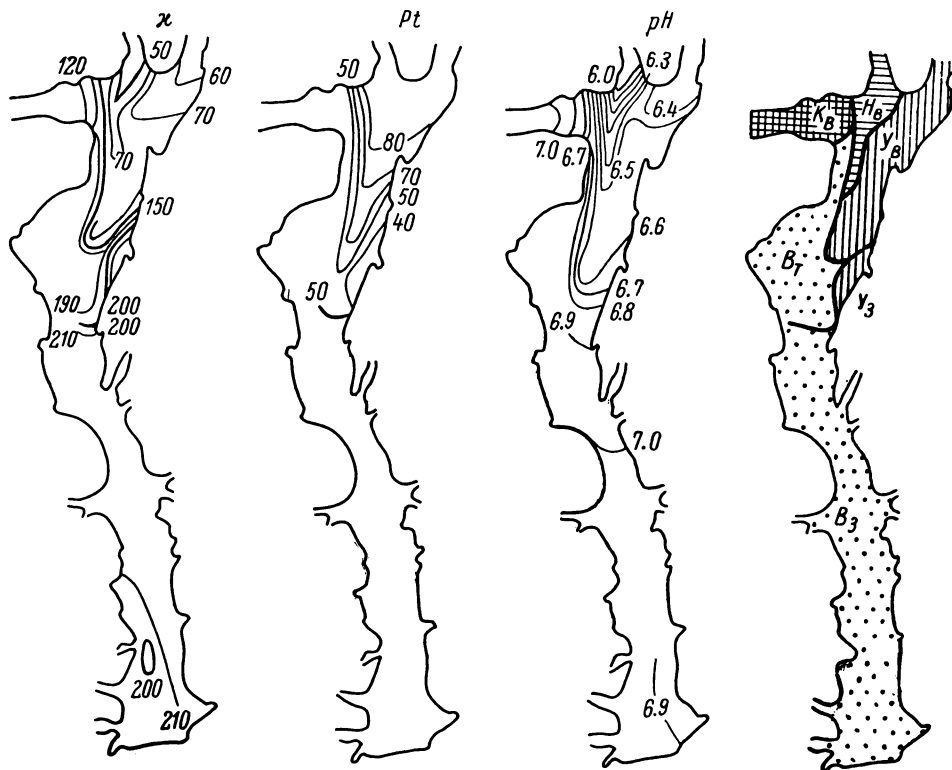


Рис. 7. Распределение показателей в поверхностном слое воды озерной части водохранилища и размещение водных масс 24—27 IV 1963.

Обозначения к рис. 7—10, 12—16.

Водная масса	Модификация водной массы	Условное обозначение	Индекс
Ужненская	Весенняя Летняя меженная Паводочная Зимняя		У _в У _м У _п У _з
Немденская	Весенняя Летняя меженная Паводочная Зимняя		Н _в Н _м Н _п Н _з
Костромская	Весенняя		К _в
Волжская	Летне-осенняя Зимняя		В _л В _з
Озерная (собственно водохранилища)	Весенняя Летне-осенняя		О _в О _л

T — сильно трансформированные водные массы; κ — распределение электропроводности, мксм./см; HCO_3 — распределение гидрокарбонатов, мг-экв./л; $\text{Ca} + \text{Mg}$ — распределение общей жесткости, мг-экв./л; P_t — распределение цветности, град.; P — распределение прозрачности, см.

ную часть водохранилища южнее Пучежа заняли трансформированные волжские воды, заместившие находившиеся здесь ранее зимние воды водохранилища. Из речной части водохранилища в озерную в это время начали поступать воды половодья Костромы, трансформированные по

пути водами Волжской водной массы, Которосли и других притоков. Электропроводность этих вод была 105—121 мксим./см, температура 4—6°, цветность 45—50° и рН 6.7—6.9. Эта водная масса заполняла всю речную часть водохранилища ниже Костромского расширения и проникала в озерную часть вдоль старого русла Волги, где эти воды выхолаживались до 0.5—2.0° за счет расходования принесенного ими тепла на таяние льда. У Сокольского они смешивались с водами половодья Унжи и Немды, поступавшими сюда по левобережной пойменной части водоема. Между Сокольским и Пучежом находились воды смешанного происхождения. Участок водохранилища между устьем Которосли и Костромским расширением был занят водами половодья Которосли, смешанными с Волжской водной массой. Их электропроводность была 168—181 мксим./см и температура 7—10°. Участок Ярославль—Рыбинская ГЭС заполняла Волжская масса, воды которой в это время года относительно холодные и высоко минерализованные (табл. 6).

Характер распределения водных масс в водохранилище в середине весеннего периода может быть показан на примере результатов шестнадцатой гидрологической съемки, выполненной в мае 1963 г. Поступавшая из Рыбинского водохранилища Волжская водная масса в это время имела наибольшую минерализацию при электропроводности 235—247 мксим./см и температуру 10—12°. Она занимала самый верхний участок водохранилища — до Ярославля. Ниже, до Костромского расширения, располагались воды смеси этой массы и р. Которосли, о чем свидетельствуют повышенные значения электропроводности и более высокая ее температура. Костромское расширение в это время было заполнено водами половодья впадающих в него рек. В южной и центральной частях расширения воды имели электропроводность 110—120 мксим./см и цветность 65°, а северную его часть заполняли воды с электропроводностью 130—150 мксим./см и цветностью 80°. Нижний участок речной части водохранилища занимала Костромская водная масса с теми же показателями, что и в первых числах мая. Проникновение слабо трансформированной Костромской водной массы в речную часть водохранилища, наблюдавшееся нами в 1963 г., — явление сравнительно редкое и возможно лишь в периоды низких по стоку половодий, когда сбросы Рыбинского гидроузла резко сокращаются при наполнении его водохранилища. В годы с высоким весенним стоком или с близким к среднему многолетнему объему воды, сбрасываемые через Рыбинскую ГЭС, соизмеримы или превышают весенний сток Костромы. В такие годы, по-видимому, речная часть водоема бывает заполнена Волжской водной массой, которая в большей или меньшей степени разбавляется костромскими водами.

В озерной части водохранилища фронт Костромской водной массы проходил от Юрьевца на запад вдоль левой бровки старого русла Волги к цепи островов, находящихся между деревнями Воспица и Столпино. Наличие этого фронта хорошо видно по сгущению изолиний на картах-схемах распределения электропроводности, гидрокарбонатов, жесткости (рис. 8), температуры, кислорода и рН. Озерная часть ниже этой фронтальной зоны вплоть до плотины Горьковского гидроузла была заполнена единой водной массой, сформировавшейся преимущественно из вод половодья Унжи и Немды. О происхождении этих вод мы судим по низким значениям электропроводности (50—90 мксим./см), щелочности (0.30—0.80 мг-экв./л) и общей жесткости (0.50—0.90 мг-экв./л). Трансформация исходных масс, о которой свидетельствуют величины других показателей — температуры, кислорода, рН, цветности и т. д., — столь значительна, что в данном случае можно говорить о возникновении в озерной части водоема новой водной массы — весенней водной массы собственно водохранилища. Для нее характерна стратификация температуры,

кислорода, рН и низкая окрашенность (35—45°), уменьшившаяся вдвое по сравнению с таковой исходных масс. В поверхностном слое этой массы наблюдалось интенсивное развитие фитопланктона. Перечисленные особенности весенней водной массы водохранилища возникли вследствие быстрого прогрева его вод в условиях крайне замедленного водообмена. Степень трансформации вод в различных участках этой массы была неодинакова и зависела главным образом от длительности пребывания тех или иных ее частей в водоеме. Именно поэтому на северо-востоке Юрье-вского расширения воды имели несколько иные характеристики: цвет-

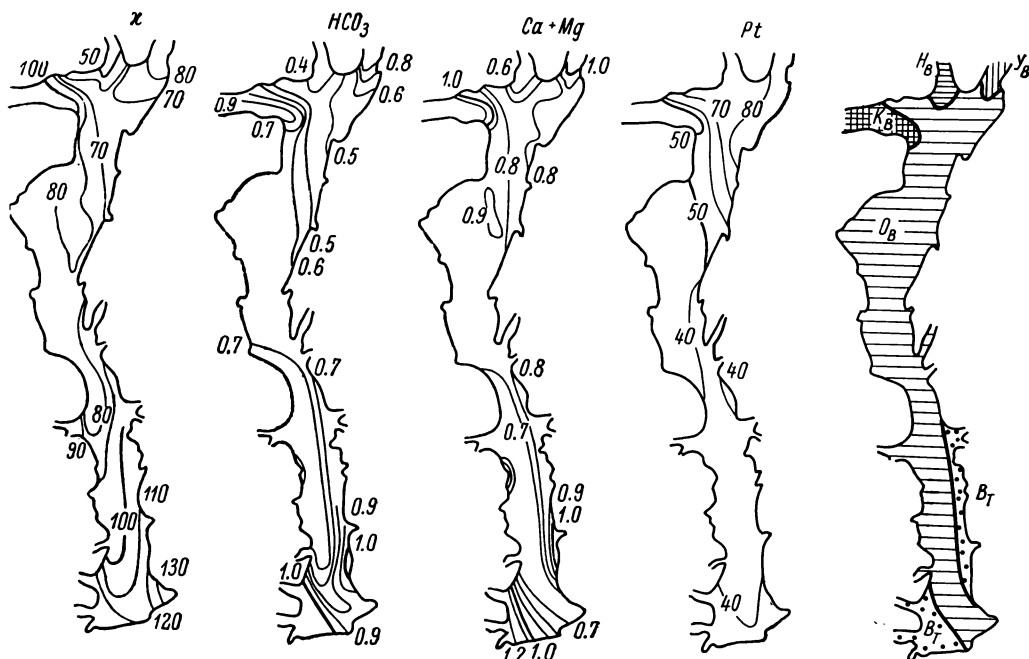


Рис. 8. Распределение электропроводности, гидрокарбонатов, жесткости и цветности в поверхностном слое воды и размещение водных масс 19—22 V 1963.

ность до 80°, рН поверхностных слоев воды около 7.0 и т. д. Заливы Унжи и Немды в это время были заполнены однородными по вертикали речными водами, сформировавшимися в бассейнах этих рек в период спада половодья (табл. 11), а в наименее проточных прибрежных участках приплотинного района водохранилища сохранились сильно трансформированные во время весеннего наполнения водоема воды Волжской массы (рис. 8).

О распределении водных масс в водохранилище в поздневесенний период дают представление материалы первой, пятой и девятнадцатой гидрологических съемок (табл. 1). В этот период, лишь в отдельных участках озерной части водоема еще сохраняются относительно небольшие по размерам пятна водной массы водохранилища, сформированной за счет вод весеннего половодья. В 1961 г., во время первой съемки, вся речная часть водохранилища была занята летней Волжской водной массой, электропроводность которой вблизи Рыбинска была равна 175 мксим./см, а по мере приближения к озерной части величина этого показателя возрастала до 200 мксим./см. Цветность этих вод составляла 50—70°, а прозрачность в среднем 100 см. В озерной части водоема однородные во всей своей массе летние волжские воды заполняли северо-западную часть Юрье-вского расширения и низовья залива по Немде (рис. 9). Четко вы-

раженный фронт между этими водами и блокированными ими высокоцветными и мало минерализованными трансформированными водами половодья Немды проходил в районе Сорочкова. На востоке и юго-востоке волжские воды соприкасались с водами половодья Унжи. Ядро последних, наименее измененных процессом смешения, располагалось у юго-восточного побережья Юрьевецкого расширения. Фронт между волжскими и унженскими водами проходил от группы Исаковских островов на

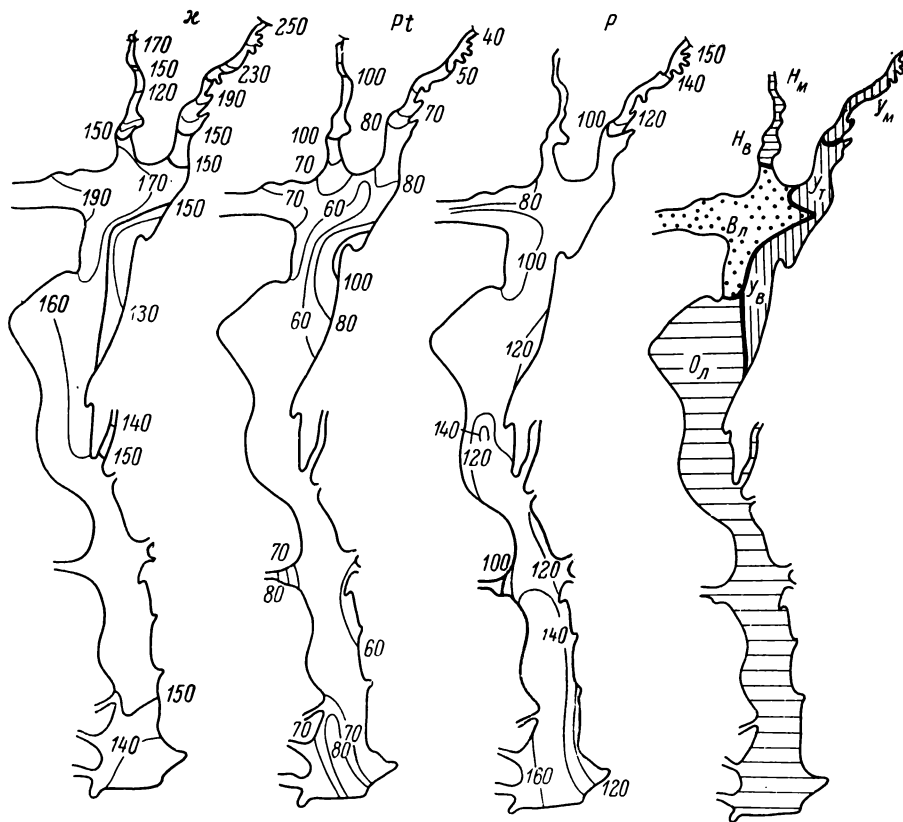


Рис. 9. Распределение электропроводности, цветности и прозрачности в поверхностном слое воды и размещение водных масс 1—5 VII 1961.

Юрьевец, а затем поворачивал на юг вдоль бровки волжского русла и западной цепочки Юрьевецких островов. Наименьшая ширина этой фронтальной зоны была на бровке против Юрьевца, где горизонтальный градиент электропроводности достигал 25 мксим./см на 1 км. В расширенном плесе к северу от Сокольского находилась зона смешения волжских и унженских вод и формирования однородной по своим свойствам водной массы южной половины озерной части водохранилища. Отчетливо выраженный у Юрьевца фронт водных масс в зоне смешения размывался.

Распределение водных масс в этот же период 1962 г. и их основные характеристики были подобны описанным. Более детальное изложение материалов этих двух съемок приведено в ранее опубликованной статье (Эдельштейн, 1965а).

В 1963 г. распределение водных масс, характерное для поздневесеннего периода, вновь повторилось (рис. 10). Но вследствие повышенного речного стока в июне этого года по сравнению с 1961 и 1962 гг. воды Немды и Унжи в рассматриваемый момент сильнее обычного продвигались

нулись к югу и занимали центральную часть Юрьевого расширения. Залив по Немде к северу от Лубян был заполнен водами дождевого паводка реки, показатели которых приведены в табл. 11. Восточная часть Юрьевого расширения и низовья Унженского залива были заняты весенними водами Унжи. В районе Нежитина эти воды отделялись четко выраженной фронтальной зоной от расположенных выше по заливу вод дождевого паводка реки. Южная половина озерной части водоема была заполнена водной массой собственно водохранилища. В отличие от пред-

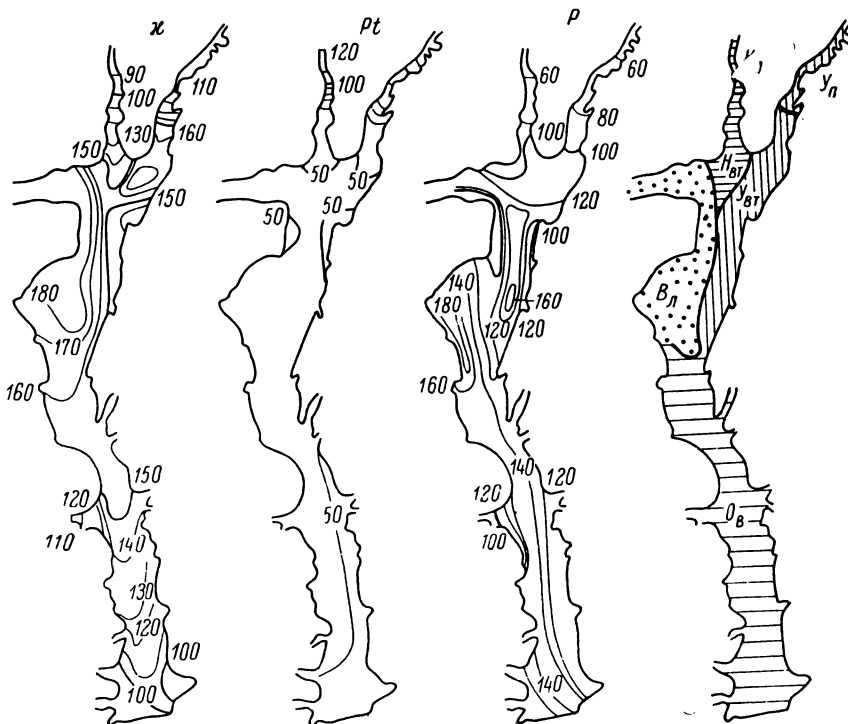


Рис. 10. Распределение электропроводности, цветности и прозрачности в поверхностном слое воды и размещение водных масс 1—5 VII 1963.

шествующих лет в рассматриваемый момент ее электропроводность (130—150 мксим./см) была ниже обычной, а в приплотинном участке были замерены значения этой характеристики даже около 100 мксим./см. По остальным показателям эта водная масса была такой же, как и в 1961 и 1962 гг. Пониженная минерализация водной массы водохранилища, а также более интенсивное, чем обычно, продвижение речных вод в открытую часть водохранилища объясняются особенностями водного баланса водоема весной 1963 г., когда поступление в него Волжской водной массы было ниже, чем в предшествующие годы, а сток рек в июне выше. Это обусловило пониженный водообмен водохранилища в весенний период и меньшую скорость вытеснения из водоема весенней водной массы.

Характерное для поздневесеннего периода распределение электропроводности воды вдоль оси Горьковского водохранилища наблюдал и В. И. Рутковский (1963) 22 VI 1960, когда значения этой характеристики уменьшались от 185—190 у г. Кинешмы до 90—100 мксим./см у Горьковского гидроузла.

Летне-осенний период

Начало летне-осеннего сезона с характерным для него распределением водных масс, судя по материалам трехлетних наблюдений, в Горьковском водохранилище обычно приходится на середину июля. К этому моменту все воды, связанные своим происхождением с весенним речным половодьем, вытесняются из водохранилища или полностью перемешиваются с летними водными массами. Особенности летне-осеннего размещения водных масс в водоеме рассмотрим на примере четырех гидрологических съемок — гряде́й, седьмой, девятой и одиннадцатой (табл. 1). Первые две из них дают представление о размещении водных масс в водохранилище и их основных свойствах во время летней межени на притоках; последние две были выполнены в период интенсивного стока паводковых вод в очень многоводный летне-осенний сезон 1962 г.

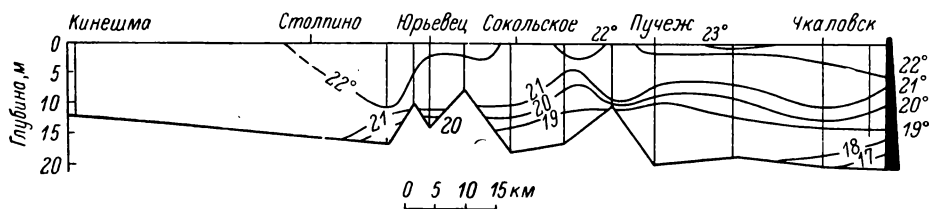


Рис. 11. Температурный разрез озерной части водохранилища (по русловым станциям) 25—28 VII 1961.

Во время июльской съемки 1961 г. вся речная часть водохранилища была заполнена Волжской водной массой с электропроводностью 160—180 мксим./см, прозрачностью 90—100 см и цветностью 50—60°. Водная масса водохранилища, находившаяся в его озерной части, по электропроводности и цветности не отличалась от Волжской массы, что является свидетельством ее, так сказать, волжского происхождения. Лишь в приплотинном участке, южнее устья Ячменя, электропроводность этих вод постепенно снижалась и у плузов Горьковского гидроузла составляла 142 мксим./см. Однако несмотря на одинаковые значения двух основных показателей обеих водных масс, водная масса водохранилища отличалась от исходных волжских вод рядом других признаков: повышенной в глубоководных районах прозрачностью (от 130 до 190 см) и наличием температурной стратификации со слоем скачка на глубине 10 м. Металимнион хорошо прослеживался на всех русловых станциях внутри этой водной массы (рис. 11). Указанные признаки трансформации исходной массы в водную массу озерного типа появились между устьем Елнати и Юрьевцем, где, следовательно, и проходила условная граница между Волжской и летней водной массой собственно водохранилища. Фронт последней с водами Унжи, имевшими электропроводность более 200 мксим./см, был четко выражен в районе Втарушенского острова, южнее Кобылина (рис. 12).

В июле 1962 г. распределение водных масс в водохранилище напоминало описанное выше. Речная часть целиком была занята Волжской водной массой, электропроводность которой была всего на 10 мксим./см ниже, чем в соответствующий период 1961 г. В южной части Костромского расширения наблюдалась очень размытая зона смешения этой массы и меженных вод Костромы, которые в наиболее «чистом» виде были обнаружены в северной части расширения. Их характеристики приведены в табл. 11. В озерной части водохранилища Волжская водная масса занимала правобережный надрусловый участок Юрьевецкого расширения

и западную половину расширенного плеса к северу от Сокольского (рис. 13). Остальная часть озерного района водохранилища была заполнена летней водной массой волжского происхождения, сильно трансформированной здесь за счет смешения с остатками вод половодья притоков и прогрева в условиях замедленного водообмена. И только в северо-восточной части Юрьевого расширения находились меженные воды Унжи, имевшие повышенную минерализацию и электропроводность. В верховьях Унженского залива — у Николо-Макарова — в это время появились

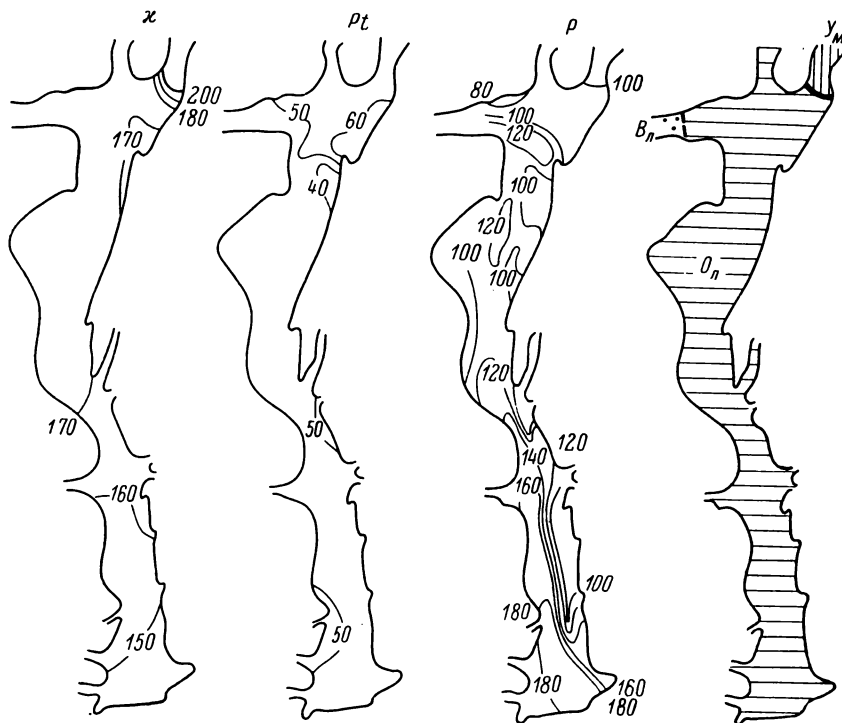


Рис. 12. Распределение электропроводности, цветности и прозрачности в поверхностном слое воды и размещение водных масс 25—28 VII 1961.

воды дождевого паводка, резко отличавшиеся от меженных вод реки по всему комплексу показателей (табл. 11).

Очень высокий летний сток по Унже мало минерализованных и высокоцветных вод преимущественно дождевого питания определил к началу сентября 1962 г. характер распределения водных масс в озерной части водохранилища, в значительной мере напоминающий основные черты, присущие поздневесеннему периоду. Волжские воды занимали западную часть Юрьевого расширения и русловой участок водохранилища между его правым берегом и Юрьевоцкими островами (рис. 14). Трансформированные паводковые воды Унжи, отличающиеся от вод ее половодья большей мутностью и повышенной цветностью, находились в Унженском заливе, в восточной части Юрьевого расширения и в пойменном участке водоема между Юрьевоцкими островами и левым берегом. При этом ядро трансформированных вод паводка находилось, как и в конце весны, в районе левобережной станции Юрьевоцкого разреза. Северную часть Юрьевоцкого расширения и низовья Немденского залива занимали воды Немды, видоизмененные смешением с волжскими водами. В расширенном плесе выше Сокольского и южнее, до Пучежа, находилась зона

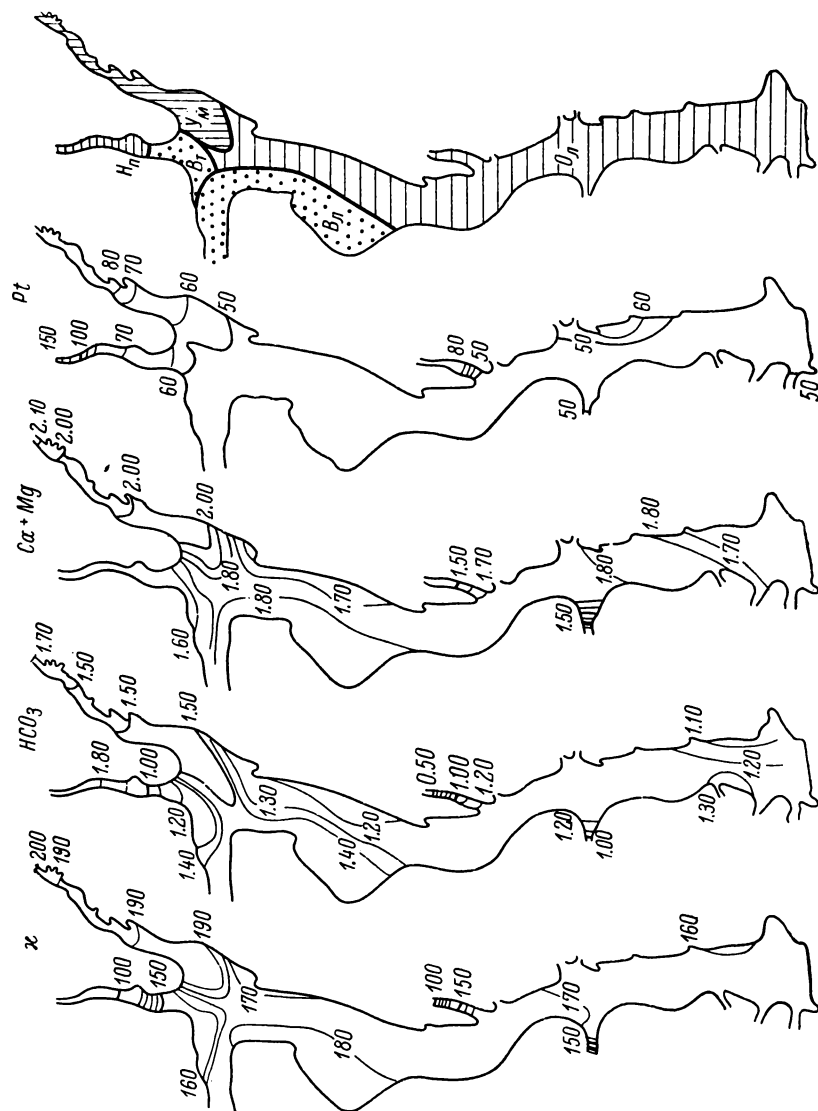


Рис. 13. Распределение электропроводности, гидрокарбонатов, жесткости и цветности в поверхностном слое воды и размещение водных масс 20—26 VII 1962.

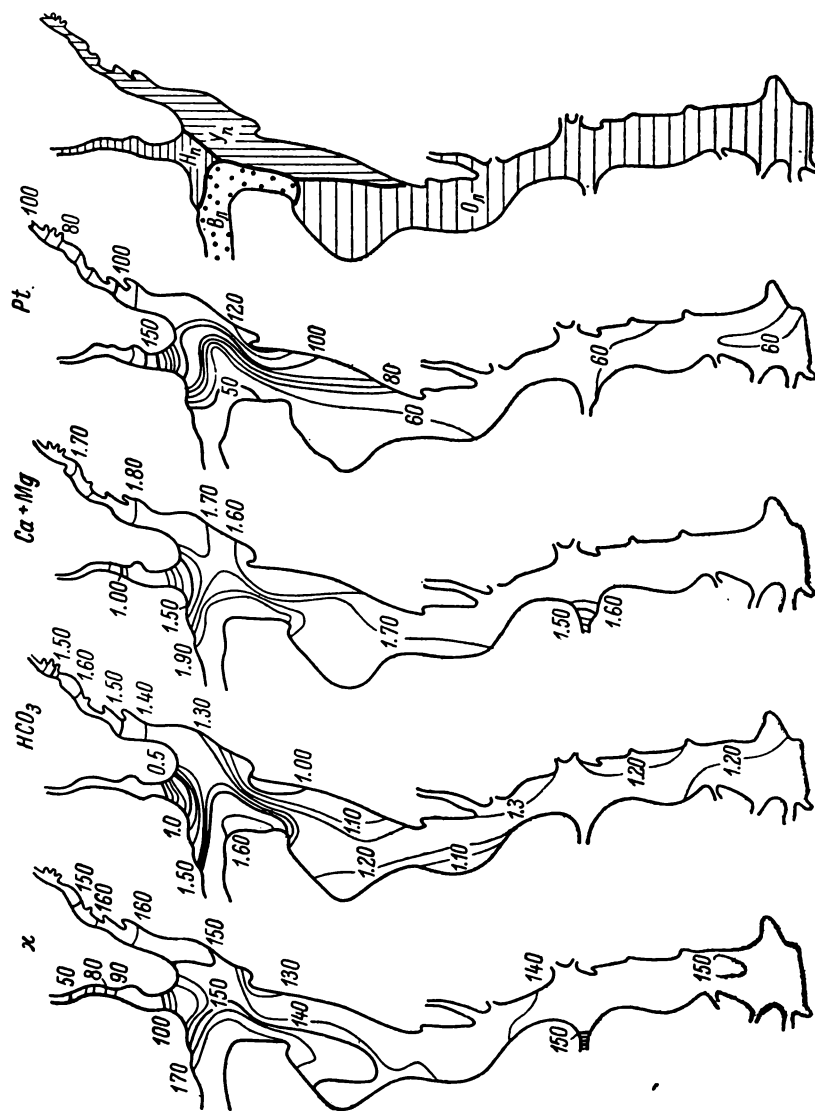


Рис. 14. Распределение электропроводности, гидрокарбонатов, жесткости и цветности в поверхностном слое воды и размещение водных масс 2—7 IX 1962.

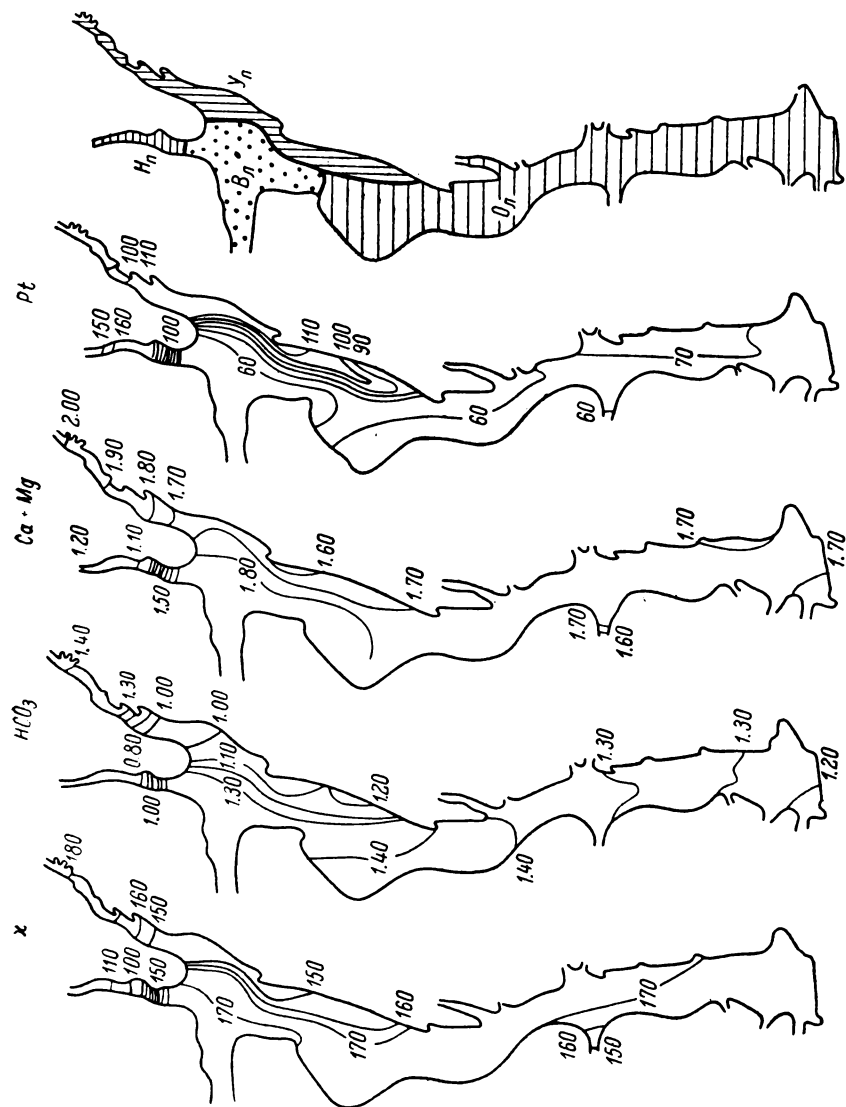


Рис. 15. Распределение электропроводности, гидрокарбонатов, жесткости и цветности в поверхностном слое воды и размещение водных масс 21—26 X 1962.

интенсивного смешения волжских и унженских вод. Приплотинная часть водохранилища, как и в августе, была занята однородной летней водной массой собственно водохранилища.

О характере распределения водных масс в водохранилище в позднесенний период можно судить по данным октябрьской съемки 1962 г. Речная часть водоема в это время по-прежнему была заполнена Волжской водной массой. Электропроводность ее была равна 150—170 мксим./см и постепенно увеличивалась с приближением к озерной части водохранилища. Температура воды составляла 5.0—6.5°. Приустьевые заливы притоков заполняли речные воды, отличавшиеся от Волжской водной массы не только повышенной минерализацией, но и пониженной температурой. Так, в Костромском расширении максимальная температура, измеренная нами во время этой съемки, составляла 4.8°, а на мелководных участках она не превышала 2.5°. В заливах Меры, Желваты, Елнати и других температура воды также была на 2—4° ниже, чем в Волжской водной массе. В озерном районе водохранилища последняя занимала центральную, северную и западную части Юрьевого расширения. На севере, в районе Лубян, она соприкасалась с водами Немды, имевшими значения показателей, характерные для паводковых вод этой реки (табл. 11). Воды Немды имели температуру ниже 2.0°. Унженская водная масса, менее минерализованная и гораздо более цветная, чем Волжская, заполняла восточную часть Юрьевого расширения и большую часть левобережной поймы расширенного плеса у Сокольского (рис. 15). В Унженском заливе севернее Нижитина минерализация и электропроводность воды возрастали, а цветность несколько снижалась. Температура воды здесь, как и в Немденском заливе, была ниже 2.0°. Всю остальную часть озерного района водохранилища заполняла однообразная по своим характеристикам озерная водная масса, сформировавшаяся в основном из вод волжского происхождения, к которым примешивались воды речного паводка. Свидетельством этому является на 15—20° более высокая цветность водной массы водохранилища по сравнению с чисто волжскими водами. Остальные ее показатели по своим величинам близки к таковым Волжской водной массы.

Зимний период

Ввиду труднодоступности водохранилища в зимний период для характеристики распределения и основных свойств водных масс мы располагаем материалами всего двух гидрологических съемок (табл. 1), выполненных по сокращенной программе по сравнению со съемками в навигационные периоды. Однако сокращение объема наблюдений зимой, по-видимому, не является причиной меньшей детальности характеристики водных масс исследованного водоема, поскольку высокая его проточность зимой, значительное преобладание по расходу Волжской водной массы над речными и изоляция водных масс ледяным покровом от непосредственного воздействия метеорологических факторов обуславливают большую однородность вод, заполняющих водохранилище в зимний период.

По данным первой зимней съемки, почти все водохранилище было заполнено Волжской водной массой, очень однородной по своим свойствам (рис. 16). Температура волжских вод от поверхности до дна имела значения 0.0—0.2°. Воды с такими же характеристиками занимали и поверхностные слои (до глубины 4—5 м) нижнего участка залива по Мере, но температура их здесь была выше, увеличиваясь с глубиной до 0.8°. Придонные слои воды в низовьях залива, а выше Долматова и всей вертикали представляли собой зимнюю водную массу Меры, показатели которой приведены в табл. 11. Вверх по заливу температура воды в при-

донном горизонте понижалась, и у Долматова она составляла 0.3° . Аналогичная картина вертикального расслоения вод наблюдалась и в приустьевом заливе Елнати у автодорожного моста. В поверхностном четырехметровом слое находились волжские воды с электропроводностью 189 мксим./см и pH 7.0, а в двухметровом придонном слое — зимние воды реки с электропроводностью 242 мксим./см, pH 6.8 и цветностью 40° . Температура воды по вертикали постепенно возрастала с глубиной и у дна достигала 0.7° .

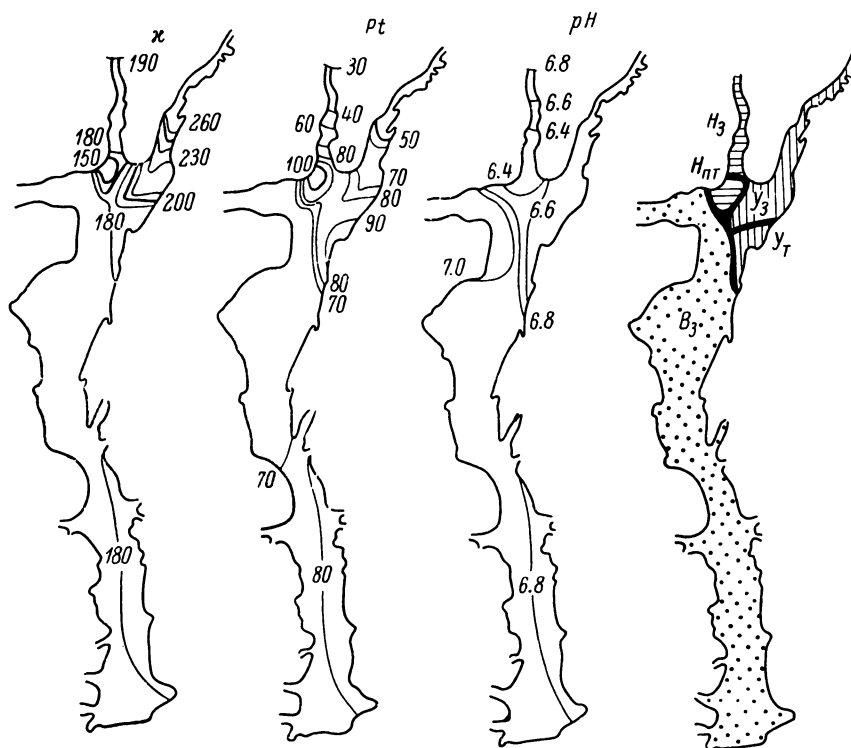


Рис. 16. Распределение электропроводности, цветности и pH в придонном слое и размещение водных масс 6—14 II 1963.

В северной части Юрьевецкого расширения были обнаружены воды Немды с электропроводностью 140—160 мксим./см, высокой цветностью (до 100°) и pH 6.4. Приведенные значения показателей указывают на то, что это были речные воды, сформировавшиеся в позднесенний период. О длительном пребывании их на одном месте говорят высокие значения придонных температур: на залитой пойме 1.2° , в старом русле Немды на траверзе Завражья 1.5° . Четко выраженный фронт между этой водной массой и волжскими водами проходил от Завражья к южной оконечности группы Исаковских островов и далее на северо-восток к Немдо-Унженскому водоразделу. Выше по заливу Немды электропроводность воды возрастала до 190 мксим./см, pH до 6.8, а цветность понижалась до 30° , что свидетельствует о поступлении в залив зимних вод Немды.

Унженский залив был в это время целиком заполнен зимними водами Унжи. В открытой части водохранилища воды этой реки были обнаружены в придонном горизонте на вертикали у Исаковского острова в старом русле Унжи. Верхний пятиметровый слой на этой станции составляли воды Волжской массы с электропроводностью 187—190 мксим./см, цветностью 75° и pH 7.0. На глубине 7 м и ниже находились воды, электро-

проводность которых была около 225 мксим./см, цветность 85° и рН 6.6. Температура воды на этой вертикали постепенно увеличивалась ко дну, где она достигала максимального из измеренных нами на Горьковском водохранилище в период ледостава значения 2.1°. Помимо описанного застойного участка с унженскими водами у дна, в левобережной части Юрьевоцкого разреза было установлено наличие осенних паводковых вод Унжи с электропроводностью 172 мксим./см, цветностью 95° и рН 6.7, которые, возможно, заполняли и восточную часть левобережной поймы расширенного плеса к северу от Сокольского. За исключением перечисленных участков, весь остальной объем водохранилища в феврале 1963 г. был заполнен зимней Волжской водной массой.

В предвесеннюю съемку картина распределения водных масс в водоеме почти не изменилась. По-прежнему всю речную и большую половину озерной части водохранилища занимала Волжская водная масса. Ее электропроводность к этому времени увеличилась до 200—216 мксим./см, цветность составляла 70° и рН 6.9—7.0, температура во всей толще была близка к 0°. Фронт между Волжской водной массой и водами Немды сохранился на том же месте, но характеристики речных вод изменились в результате смешения осенних и подошедших к Завражью зимних вод. Электропроводность вод Немды в районе Завражья возросла до 194—197 мксим./см, цветность понизилась до 40° и рН стало равно 6.5. Придонная температура почти не изменилась и была равна 1.1—1.3°. Верховья залива занимали зимние воды Немды с характерными для этого периода значениями показателей (табл. 11). Как и в предшествующую съемку, Унженская водная масса занимала придонные слои восточной части Юрьевоцкого расширения, но мощность их возросла с 3.5 до 7.0 м. Поверхностные 1.5—2.0 м занимала Волжская водная масса. Электропроводность унженских вод возросла до 286 мксим./см, а цветность уменьшилась до 70°. Придонная температура понизилась до 1.6°. Воды унженского происхождения были обнаружены и на Юрьевоцком разрезе, где они занимали все пространство между восточной цепью Юрьевоцких островов и левым берегом водохранилища.

В приплотинном участке водоема южнее Пучежа имела место заметная неоднородность вод по поперечному сечению водохранилища. Право-

Т а б л и ц а 15

Характерные значения некоторых показателей основных водных масс
Горьковского водохранилища

	Модификация водной массы	Показатели		
		электропровод- ность, мксим./см	цветность, град.	прозрачность, см
Водная масса				
Волжская	Летняя	130—190	35—60	40—110
	Зимняя	200—240	50—80	—
Унженская	Весенняя	50—100	80—110	60—80
	Летняя меженная	220—250	40—50	120—155
	Паводочная	140—180	90—120	40—60
	Зимняя	320—350	20—30	—
Немденская	Весенняя	30—80	80—100	60—70
	Летняя меженная	150—180	60—80	70—80
	Паводочная	70—110	120—150	30—50
	Зимняя	190—120	20—30	—
Собственно водохра- нилища	Весенняя	80—120	35—50	80—100
	Летне-осенняя	140—180	40—60	100—200

бережную, надрусловую часть занимали воды с электропроводностью 216 мксим./см, цветностью 70° и рН 6.9. Левобережная, надпойменная часть была заполнена водами с электропроводностью 177 мксим./см, цветностью 80° и рН 6.6, с температурой в придонных слоях 0.4°, в то время как на русле температура во всей толще равнялась 0°. Эта неоднородность водной массы в приплотинном участке, по-видимому, объясняется значительно большей проточностью надрусловой части по сравнению с надпойменной, которая особенно ярко проявляется при понижении уровня водохранилища к концу зимнего периода. Поэтому первая из них в момент съемки была занята «свежими» волжскими водами, в то время как над поймой задержались волжские воды, пришедшие к плотине значительно раньше. Свидетельством этого является неизменность показателей вод левобережной части приплотинного участка в период между первой и второй зимними съемками, т. е. в течение более полутора месяцев.

Подводя итог характеристики распределения и свойств водных масс Горьковского водохранилища в течение гидрологического года, приводим в табл. 15 наиболее характерные, по нашим наблюдениям, пределы колебаний величин некоторых показателей основных водных масс и их модификаций, встречающихся в пределах водохранилища.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДНЫХ МАСС В ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Размещение водных масс в водохранилище и некоторые их качественные особенности являются следствием и проявлением динамических процессов, протекающих в водоеме. Характер перемещения вод и их трансформация значительно меняются как от сезона к сезону, так и в различных участках водохранилища. Интенсивность взаимосвязанных процессов определяется многими факторами: режимом поступления в водоем исходных водных масс и их свойствами, меняющимися в течение года; характером сброса вод из водохранилища через Горьковский гидроузел, что в сочетании с притоком определяет уровенный режим и проточность как отдельных участков водохранилища, так и всего водоема в целом; метеорологическим режимом водоема, важнейшими элементами которого в данном случае являются ветер, радиационный баланс и температура воздуха; морфометрическими особенностями водохранилища, его конфигурацией, глубинами, а также характером грунтов и побережья; процессами жизнедеятельности водных организмов; ледовыми явлениями; поступлением в водоем грунтовых вод и атмосферных осадков и т. д. Более подробно в работе рассматриваются первые четыре фактора, являющиеся наиболее существенными, остальные только упоминаются.

Основным методом изучения перемещения и трансформации водных масс водохранилища послужил анализ и сопоставление материалов, полученных в результате повторных гидрологических съемок водоема. Об интенсивности перемещения той или иной водной массы мы судим по скорости продвижения либо ее ядра, т. е. объема вод с устойчивым комплексом показателей в наиболее «чистом» их виде, либо по скорости перемещения фронтальной границы водных масс, характеризующейся максимальными значениями градиента репрезентативного показателя. Изменения значений отдельных характеристик водной массы между последующими съемками дают возможность составить представление о направленности и темпе трансформации вод и установить ведущие факторы этого процесса.

ВАЖНЕЙШИЕ ФАКТОРЫ ТРАНСФОРМАЦИИ И ДИНАМИКИ ВОДНЫХ МАСС

Проточность водоема. В Горьковском водохранилище роль ведущего фактора перемещения и трансформации находящихся в нем водных масс безусловно принадлежит общей проточности водоема. Проточность водохранилища в целом сильно меняется в течение года, периоды интенсивной смены вод чередуются с периодами замедленного водообмена. Значительная изменчивость проточности водохранилища связана с особенностями водохозяйственного регулирования стока Волги в створах Рыбинского и Горьковского гидроузлов, а также с водным режимом многочисленных протоков рассматриваемого водоема.

Интенсивность водообмена водохранилища непосредственно определяет скорость перемещения водных масс и продолжительность пребывания той или иной водной массы в водоеме. С увеличением скорости перемещения вод, как правило, уменьшается трансформация их свойств, поскольку сокращается время воздействия на них преобразующих факторов. В условиях замедленного водообмена они со временем приобретают черты, свойственные водным массам озерного типа, в которых основную трансформирующую роль играют гидрометеорологические и биологические факторы. От взаимной скорости перемещения соседних водных масс зависит и интенсивность процесса их смешения, который также приводит к трансформации, видоизменению первоначальных свойств вод. В тесной связи с проточностью отдельных районов водоема находится степень изменения оптических свойств водной массы, процессы осаждения и взвешивания наносов, развитие планктона и коагуляция гуминовых веществ, определяющих цветность воды.

Как уже указывалось, проточность Горьковского водохранилища определяется взаимодействием двух гидроузлов и режимом стока впадающих в него рек. Характеристика изменчивости годовых и месячных объемов воды, поступавших в водоем в период наших исследований, приведена выше при описании исходных водных масс. Но на гидродинамический режим водных масс, особенно речной части водохранилища, сильнейшее влияние оказывает внутримесячная неравномерность поступления вод через Рыбинский гидроузел. В отличие от относительно плавного характера изменения стока речных вод Волжская водная масса сбрасывается в Горьковское водохранилище отдельными кратковременными пусками, которые и определяют неустановившийся режим движения вод в речной части водохранилища.

В среднем около 98% годового объема сброса Рыбинского водохранилища проходит через агрегаты ГЭС (Белых, 1959) и поступает в Горьковское водохранилище по шекснинскому руслу. Большую часть года станция работает на полупиковом режиме с длительными ночными остановками на 6—8 час. и двойным провалом нагрузки вплоть до полной остановки турбин с 12 до 14 и с 16 до 19 час. (Балагуров, 1957). При переходе агрегатов с холостого хода на работу при полной нагрузке сбрасываемые в нижний бьеф расходы за короткий промежуток времени возрастают в десятки раз. Длительность ночного перерыва в сбросах, моменты начала и конца интенсивной сработки воды меняются от сезона к сезону в соответствии с длиной светового дня. Максимальные суточные сбросы обычно наблюдаются 2 раза в сутки, в 9 и 21 час. Расход воды в эти моменты неодинаков в различные периоды года и зависит от водообеспеченности гидроузла, нагрузки в энергосистеме и напора.

Ежедневное чередование дневных максимумов и ночных минимумов сброса нарушается в нерабочие дни, когда из-за падения нагрузки в энергосети только одна или две турбины работают на холостом ходу, а осталь-

ные вообще не работают. Количество воды, поступающее в такие дни в нижний бьеф, определяется незначительными холостыми сбросами ГЭС и фильтрацией, а в навигационный период, кроме того, расходами воды на шлюзование. Последние поступают в Горьковское водохранилище по волжскому руслу и в среднем за сутки обычно составляют около 2% общего сброса воды в нижний бьеф гидроузла. В отдельные месяцы амплитуда колебания среднесуточных расходов воды через Рыбинскую ГЭС может достигать 2000—2500 м³/сек. Отклонения от обычного пикового режима работы гидроузла бывают только в периоды высоких половодий, когда емкость Рыбинского водохранилища близка к наполнению (например, май 1961 г.).

Вторым фактором, определяющим проточность водохранилища в целом, является режим сработки воды Горьковским гидроузлом. От работы последнего зависят внутригодовые изменения уровня и объема его верхнего бьефа, а следовательно, уклоны и скорости течения вдоль всего водохранилища. Особенности режима регулирования стока этим гидроузлом связаны, во-первых, с относительно небольшим полезным объемом водохранилища (2.75 км³), позволяющим осуществлять только сезонное регулирование стока, во-вторых, с его положением в качестве замыкающего водохранилища верхневолжского каскада. Максимальные расходы воды сбрасываются из водохранилища весной в виде ежегодно четко выраженного пика. В навигационный период сбросы производятся таким образом, чтобы, с одной стороны, сохранить в верхнем бьефе положение уровня, близкое к НПГ, а с другой — чтобы обеспечить поступление в нижний бьеф гарантированного расхода воды для поддержания там судоходных глубин. При притоке в водохранилище выше указанного расхода сработка ведется в пиковом режиме. В зимний период амплитуда колебаний суточных сбросов возрастает за счет понижения величины гарантированного расхода, увеличения транзитного стока из Рыбинского водохранилища и предвесенней сработки собственного полезного объема водохранилища. Значительно выше обычных были сбросы летом 1962 г., вызванные высоким летним притоком в водоем.

Весьма удобным показателем проточности всего водохранилища в целом служит коэффициент его водообмена (табл. 16).

Таблица 16

Коэффициенты водообмена Горьковского водохранилища

Годы	Месяцы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1957	0.89	0.75	0.59	1.55	1.29	0.48	0.70	0.36	0.40	0.55	0.53	0.54
1958	0.66	0.81	0.99	1.50	1.43	0.59	0.45	0.40	0.34	0.40	0.35	0.44
1959	0.56	0.62	0.65	1.17	0.64	0.40	0.45	0.34	0.32	0.36	0.30	0.39
1960	0.43	0.64	0.77	0.77	0.28	0.27	0.28	0.26	0.26	0.28	0.27	0.27
1961	0.35	0.48	0.67	0.86	1.28	0.42	0.34	0.36	0.42	0.40	0.36	0.49
1962	0.46	0.53	0.73	1.25	0.61	0.42	0.66	0.57	0.51	0.49	0.59	0.59
1963	0.70	0.45	0.53	0.91	0.36	0.30	0.44	0.34	0.29	0.28	0.28	0.35
Средние	0.58	0.61	0.70	1.14	0.84	0.41	0.47	0.38	0.36	0.39	0.38	0.44

Как видно из приведенной таблицы, наибольшая проточность водохранилища наблюдается весной — в апреле и мае, когда месячная сработка воды из водохранилища в среднем соизмерима с его объемом. В летне-осенний период проточность водохранилища минимальна; в течение зимы его проточность постепенно возрастает. Следует отметить повышенный

водообмен водоема по сравнению с обычным летом 1962 г., что явилось следствием высокого речного стока и интенсивных сбросов через гидроузел в этот период. Годовой коэффициент водообмена, как и месячные, подвержен значительным колебаниям и зависит от водности года. Величина годового коэффициента водообмена водохранилища изменялась от 8.63 в 1957 г. до 4.78 в маловодном 1960 г. при среднем годовом значении этого показателя за 1957—1963 гг. 6.72. Для сопоставления интенсивности проточности Горьковского водохранилища с другими аналогичными водоемами приводим табл. 17. Как видно из таблицы, только пять крупных водохранилищ ЕТС характеризуются меньшими, чем Горьковское, значениями коэффициента водообмена. Более полные данные по водообмену водохранилищ СССР опубликованы в работе О. П. Антиповой (1961), однако приводимые ею коэффициенты водообмена не во всех случаях совпадают с данными других авторов.

Т а б л и ц а 17

Средние годовые коэффициенты водообмена некоторых водохранилищ европейской территории СССР

Водохранилище	Период	Коэффициент водообмена	Литературный источник
Череповецкое . . .	1964—1965	0.9	Ершова, 1967
Цимлянское . . .	—	1.05	Лапицкий, 1961
Рыбинское . . .	1948—1961	1.82	Буторин и Курдина, 1965
Каховское	—	2.5—3.5	Цеев, 1962
Куйбышевское . .	1957—1959	5.4	Широков, 1961
Горьковское . . .	1957—1963	6.72	Наши данные
Волгоградское . .	—	7.5	Елисеев, 1965
Камское	1957—1958	Около 10	Дубровин и др., 1959
Угличское	1950—1956	12.4	Курдина, 1959
Иваньковское . .	1951—1956	13.6	Зиминова, 1959
Днепроовское . . .	—	17.0	Тихий, 1959
Саратовское . . .	По проекту	17.0	Яковлева, 1961
Днепродзержинское	»	21.0	Макеев, 1961
Кегумское	—	138.0	Тихий, 1959

Основные черты метеорологического режима водохранилища. Роль метеорологического режима водоема в процессе трансформации его водных масс очень велика. Особенно большое значение имеют сила и направление ветра, составляющие радиационного баланса и температура воздуха. Прежде всего перечисленные элементы метеорологического режима в основном определяют термическое состояние водных масс, характер и скорость их прогрева и охлаждения. Ветровое воздействие на воды водохранилища вызывает их перемешивание, волнение, сгонно-нагонные явления, которые ускоряют трансформацию водных масс, а в отдельных случаях (в условиях озерной части Горьковского водохранилища) оказывают заметное влияние на их перемещение. В период ледостава воздействие метеофакторов на водную массу водоема минимально и сводится лишь к тому, что от погодных условий зависит в основном мощность ледяного и снежного покрова водоема и теплообмен последнего с атмосферой.

Климат в бассейне водохранилища умеренно-континентальный, с коротким и сравнительно теплым летом и продолжительной, холодной и многоснежной зимой. По многолетним данным, переход среднесуточ-

ной температуры воздуха через 0° происходит в первой декаде апреля, после чего начинается интенсивное снеготаяние и постепенное повышение температуры воды под льдом. Разрушение ледяного покрова и очищение водоема ото льда обычно наблюдается в конце апреля—первой декаде мая. Поскольку наибольший приток солнечной радиации приходится на май, июнь и июль, весенний прогрев водных масс в водохранилище происходит весьма интенсивно. Преобладающие в мае слабые (2—5 м/сек.) ветры западной и южной четверти способствуют вертикальному перемешиванию вод водоема, которые прогреваются к середине мая до $8\text{--}11^{\circ}$ при почти полной гомотермии. Позже, когда проточность водохранилища уменьшается, в результате прогрева поверхностных слоев воды при отсутствии сильного ветрового перемешивания, возникает слой температурного скачка. Суточные колебания температуры воздуха, достигающие иногда $15\text{--}20^{\circ}$, и интенсивный теплообмен воды с атмосферой вызывают значительные внутрисуточные периодические изменения температуры поверхностных слоев водохранилища, максимальная амплитуда которых может иногда составлять $5\text{--}6^{\circ}$. Весенняя водная масса озерной части водохранилища расслаивается, причем процессы трансформации вод в эпилимнионе протекают энергичнее, чем в гиполимнионе, главным образом за счет активной жизнедеятельности планктонных организмов. Плотностное расслоение озерных вод определяет и характер втекания в открытую часть водохранилища исходных водных масс.

Летом под воздействием ветро-волнового перемешивания и дальнейшего прогрева слой скачка погружается, либо полностью разрушается, что приводит к образованию весьма однородной по вертикали летней водной массы собственно водохранилища. Особенно важную роль в формировании последней играют перемещения вод, вызванные сгонно-нагонными колебаниями уровня, достигающими в отдельные моменты 30—40 см (Ярославцев, 1965), а также течения в прибрежной зоне. При сильных ветрах скорости этих течений возрастают до 30—80 см/сек. (Ярославцев, 1961), что способствует обогащению взвесями вод открытых частей водоема. С созданием водохранилища ветры над его акваторией заметно усилились. По данным Волжской гидрометеорологической обсерватории, у Юрьевца повторяемость ветров со скоростью 6—10 м/сек. возросла с 32 до 48%, ветров с силой 11—15 м/сек. — с 4.0 до 5.4% и более 15 м/сек. — с 2.0 до 4.3%.

С середины августа в связи с понижением температуры воздуха и уменьшением солнечной радиации начинает преобладать теплоотдача водных масс водохранилища. Осеннее выхолаживание вод, протекающее, как правило, при умеренных и сильных ветрах, происходит относительно равномерно по всей толще водной массы водохранилища, температура которой к первой половине ноября понижается до $0\text{--}1^{\circ}$. В середине ноября обычно наступает ледостав.

Основные черты изменения важнейших элементов метеорологического режима водохранилища в годы наших исследований видны на рис. 17, где изображены декадные величины средних максимальных и минимальных температур воздуха, продолжительность солнечного сияния, выраженная в процентах от возможной продолжительности, суммы осадков и среднемесячные и максимальные за месяц величины скорости ветра, по данным метеостанций Юрьевец и ВГМО. Эти пункты достаточно хорошо отражают метеорологические условия над акваторией озерной части водохранилища, где трансформация водных масс за счет метеорологических факторов наиболее ярко выражена.

М о р ф о м е т р и ч е с к и е о с о б е н н о с т и в о д о е м а . Характер перемещения водных масс и их трансформация в водохранилище тесно связаны с морфометрией его ложа. Конфигурация водохранилища,

Водохранилище имеет большое число заливов, образовавшихся в результате затопления нижних участков долин его притоков. Наиболее крупными из них являются заливы по Костроме (Костромское расширение), по Унже, Немде, Мере, Желвате, Елнати и некоторые другие. Заливы, как правило, имеют наибольшую ширину и глубину в своих низовьях, а к верховьям сужаются и постепенно переходят в русло соответствующего притока. Исключение составляет Костромское расширение, имеющее три широких и мелководных плеса и соединяющееся с волжским руслом узким проливом.

Поскольку колебания уровня в нижней части водохранилища большую часть года невелики, ее конфигурация и глубины практически не меняются в течение всего навигационного периода. При зимней сработке уровня (по проекту на 2 м) площадь и объем водохранилища изменяются: первая на 23, второй на 32% (Буторин, 1963) в основном за счет осушения мелководий, расположенных преимущественно в приустьевых заливах и отчасти в северном районе озерного участка водохранилища. Понижение уровня и уменьшение глубин в период ледостава способствует увеличению относительной шероховатости пойменных участков водоема по сравнению с русловыми и приводит к значительной неоднородности водообмена этих участков.

ДИНАМИКА И ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДНЫХ МАСС В РЕЧНОЙ ЧАСТИ ВОДОХРАНИЛИЩА

Динамический режим вод, заполняющих речную часть водохранилища, определяется главным образом режимом сбросов Рыбинской ГЭС. Сток притоков и характер регулирования уровня в верхнем бьефе Горьковского гидроузла играют меньшую роль в процессе перемещения Волжской водной массы. Ветровое воздействие на воды в этой части водохранилища несущественно из-за небольшой ее ширины и значительной извилистости.

Почти всю акваторию речной части водоема занимает Волжская масса, поступающая из Рыбинского водохранилища. Водные массы наиболее крупных притоков этого района водоема — Которосли и Костромы — большую часть года занимают незначительные по площади участки (находящиеся в подпоре предустьевые зоны своих русел) и только иногда в период половодья могут распространяться в бывшее русло Волги. Влияние вод остальных притоков речной части на основную водную массу водохранилища ничтожно и ощущается лишь в верховьях их приустьевых заливов.

Волжская водная масса во время перемещения по речному участку водохранилища трансформируется в результате смешения с водами притоков, а также под воздействием метеорологических факторов. Наиболее значительные изменения характеристик волжских вод наблюдаются весной при смешении с большими объемами маломинерализованных и относительно теплых вод крупных притоков. На рис. 18, а изображено изменение электропроводности и температуры воды по поверхности вдоль волжского судового хода, характерное для различных моментов весеннего периода. В первую декаду после схода ледяного покрова (съемка 3—4 V 1963) из Рыбинского водохранилища в Горьковское поступают высокоминерализованные воды с электропроводностью более 200 мксим./см. Ниже устья Которосли, и особенно ниже нового устья Костромы (точнее, пролива, соединяющего Костромское расширение с волжским руслом), электропроводность резко падает.

В поздневесенний период, во время спада половодья на крупных притоках (съемки 16—18 и 28—30 V 1963) электропроводность воды

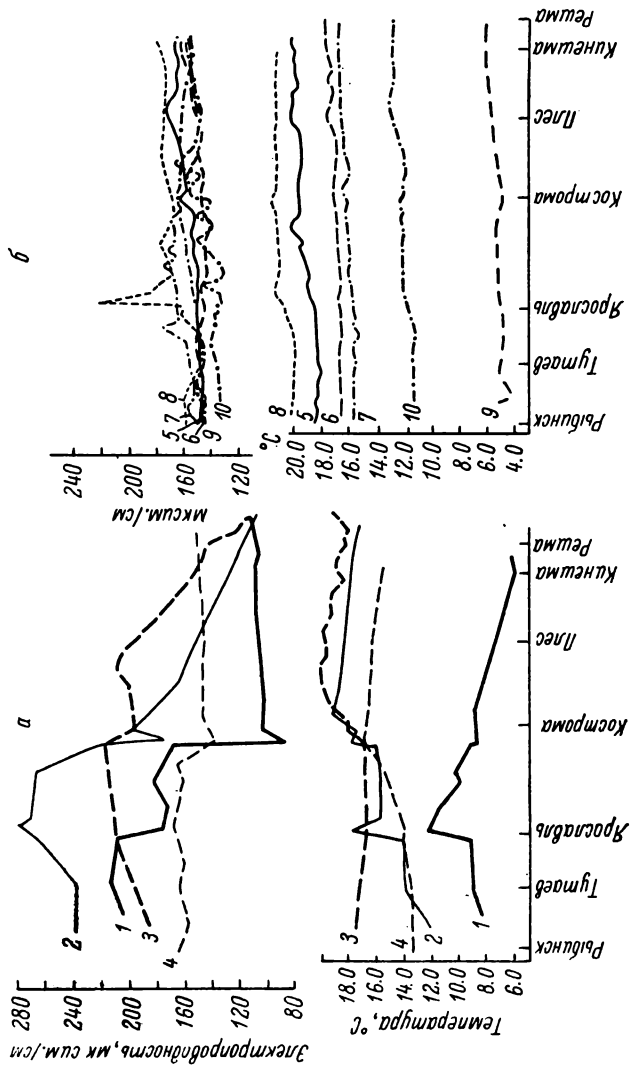


Рис. 18. Изменение электропроводности и температуры поверхностного слоя воды вдоль речной части водохранилища в весенний (а) и летне-осенний период (б).
 1 — 3—4 V 1963; 2 — 18 V 1963; 3 — 28—30 V 1963; 4 — 1—3 VI 1961; 5 — 17—19 VII 1962; 6 — 1—3 VIII 1962; 7 — 20—21 VIII 1962; 8 — 23—25 VII 1961; 9 — 17—20 X 1962; 10 — 12—14 IX 1962.

ниже устья Которосли повышается, а ниже Костромского расширения понижается. На нижней границе речного участка водохранилища в течение почти месяца электропроводность воды в 1963 г. оставалась постоянной — около 110 мксим./см (рис. 18). Неизменность этой характеристики, по-видимому, свидетельствует о замедлении перемещения вод и накоплении их здесь в этот период. На повышение уровня за счет

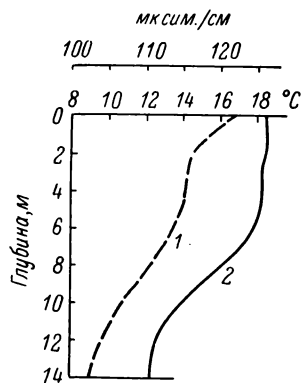


Рис. 19. Вертикальное распределение температуры (1) и электропроводности (2) воды у Кинешмы 18 V 1963.

накопления весенних вод указывает и значительное вертикальное расслоение водной массы, отмечавшееся в середине мая в районе Кинешмы (рис. 19), связанное с натеканием более прогретых и менее минерализованных вод на ранее поступившие сюда воды.

Трансформация Волжской водной массы весной хорошо заметна не только по изменениям электропроводности, но и температуры (табл. 18). Во-первых, холодные воды, поступающие из Рыбинского водохранилища, быстро прогреваются на верхнем участке за счет интенсивного теплообмена с атмосферой, которому способствует хорошее перемешивание воды во время пусков ГЭС. Во-вторых, повышение температуры происходит в результате смещения волжских вод с речными, которые в это время прогреты гораздо сильнее (табл. 8).

В другие сезоны изменения физико-химических свойств воды в речной части водохранилища менее значительны. Электропроводность в летне-осенний период колеблется в пределах 135—160 мксим./см и обычно, как и температура воды, постепенно возрастает от Рыбинска к Кинешме. Зимой, судя по материалам двух рейсов 1963 г., водная масса на всем протяжении речной части Горьковского водохранилища практически полностью однородна (табл. 19).

Таблица 18

Среднедекадная температура воды на верхнем участке водохранилища (средняя за 1957—1963 гг.)

Водомерный пост	Апрель			Май		
	I	II	III	I	II	III
Рыбинск	0.4	1.1	2.4	4.4	7.6	11.1
Тутаев	0.3	1.5	3.4	5.9	8.2	11.1
Ярославль	0.2	1.5	3.8	6.6	8.4	11.2

В условиях очень сложного и неустановившегося динамического режима вод в речной части водохранилища обычные экспедиционные методы исследования течений не дают полного представления о характере перемещения вод на этом участке водоема. Поэтому мы предприняли попытку установить основные черты гидродинамического режима этой водной массы косвенным путем, анализируя закономерности поступления вод в водоем и колебания уровня и уклонов водной поверхности совместно с особенностями распределения некоторых характеристик водной массы.

Во время гидрологических съемок в пределах Волжской водной массы неоднократно отмечались незначительные по величине, но вполне законо-

Таблица 19

Некоторые характеристики воды в речной части водохранилища зимой 1963 г.

Пункт наблюдений	I рейс				II рейс			
	дата	электро- провод- ность, мксим./см	цвет- ность, град.	pH	дата	электро- провод- ность, мксим./см	цвет- ность, град.	pH
Рыбинск	2 II	196	80	7.0	27 III	206	70	7.0
Ярославль	3 II	183	80	7.1	28 III	214	70	7.0
Кострома	4 II	207	70	7.0	28 III	208	70	7.0
Кинешма	10 II	197	67	7.0	1 IV	224	70	7.0

мерные колебания электропроводности воды в пространстве и во времени. В результате изучения всех случаев неоднородности этой водной массы, наблюдавшихся в навигации 1961—1963 гг., создано следующее представление о качественной стороне процесса перемещения воды в речной части Горьковского водохранилища.

В течение большей части года поступление основной доли притока в водохранилище происходит через Рыбинскую ГЭС в виде периодических пусков, подчиненных четкому суточному ритму. При сбросе через ГЭС каждой новой суточной порции вод в нижнем бьефе гидроузла возникает волна пуска, быстро распространяющаяся вниз по руслу Волги. При этом на верхнем участке водохранилища почти одновременно возникает стоковое течение. Быстрота распространения толчка, связанного с началом пуска и вызывающего стоковое течение, в условиях подпертого бьефа весьма велика: более 60 км/час. (Эдельштейн, 1965б). Скорость стокового течения в момент пуска по мере удаления от ГЭС постепенно снижается, и ее величина на отдельных участках водохранилища, по-видимому, достаточно верно может быть оценена по максимальным измеренным величинам скоростей: от 130—140 у Рыбинска до 10—20 см/сек. у устья Елнати. В ночные часы после прекращения дневного пуска стоковое течение на верхнем участке затухает. По аналогии с подпертым нижним бьефом Угличской ГЭС (Буторин и Литвинов, 1962) в непосредственной близости гидроузла ночью вслед за резким падением уровня воды можно ожидать даже возникновения обратного перемещения воды в сторону ГЭС. Такого рода пульсирующий режим перемещения водной массы вследствие присущей ей инерции постепенно выравнивается на среднем участке речной части Горьковского водохранилища, ниже которого внутрисуточные колебания скорости стокового течения, вызванные сбросами Рыбинской ГЭС, неощутимы.

Отсутствие дневного пуска в нерабочие дни каждую неделю нарушает обычный суточный ритм. Стоковые течения в такие дни почти полностью прекращаются на всем протяжении речной части водоема, а на отдельных ее участках могут иногда возникать перемещения водной массы в обратном направлении. О возможности этого явления свидетельствуют нередко наблюдаемые обратные уклоны водной поверхности (Эдельштейн, 1965б). Свойственный речной части Горьковского водохранилища пульсирующий режим перемещения водной массы искажается и нарушается временными изменениями диспетчерского графика работы Рыбинской ГЭС, половодьями и паводками на крупных притоках, ледовыми явлениями, морфологическими особенностями отдельных участков водоема и т. п.

В результате анализа микронеоднородности Волжской водной массы по электропроводности было установлено (Эдельштейн, 1965б), что воды,

поступающие в нижний бьеф Рыбинского гидроузла, перемещаются затем по речной части Горьковского водохранилища отдельными объемами, своего рода «порциями». Такие порции в 10 млн м³ и более, несколько отличающиеся от окружающих вод по их электропроводности, не смешиваются с соседними в течение нескольких суток, несмотря на значительные скорости течения и интенсивное перемешивание в нижнем бьефе гидроузла. Перемещение этих «порций» водной массы может быть иногда прослежено на расстоянии 80 км и более от Рыбинской ГЭС. Они могут служить хорошим индикатором истинной скорости продвижения вод в верхнем участке водохранилища, показателем его проточности и водообмена.

ВТЕКАНИЕ РЕЧНЫХ ВОДНЫХ МАСС В ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Ведущим фактором, определяющим процесс втекания водных масс рек в водохранилище, является режим водного стока притоков. Однако характер втекания и смешения речных вод и водной массы водохранилища настолько различны на верхнем участке водоема и в других его районах, что можно говорить о существовании в пределах Горьковского водохранилища двух типов устьевого процесса. Один из них свойствен притокам верхней части водохранилища, где гидродинамический режим водоема определяется попусками Рыбинской ГЭС. Второй тип втекания характерен для притоков озерной части водохранилища, где процессы смешения и трансформации речных масс протекают в основном в пределах приустьевых заливов водоема и зависят от уровенного режима верхнего бьефа Горьковского гидроузла. Роль ветрового фактора в динамических процессах в приустьевых заливах, как и в речной части водохранилища, невелика по сравнению с другими факторами.

Характерным примером первого типа втекания речных водных масс в водоем может служить процесс смешения вод Которосли с Волжской водной массой. Для режима устьевого участка Которосли характерен хорошо выраженный суточный ритм в течение большей части года, исключая весенний период. В ночные часы, когда сбросы Рыбинского гидроузла невелики, наблюдается сток вод Которосли в волжское русло, где и происходит смешение обеих водных масс. В утренние часы, спустя 3—5 час. после начала интенсивного сброса воды гидроэлектростанцией, уровень Волги у Ярославля настолько возрастает, что в русле Которосли возникают обратные уклоны. Воды из Волги заходят в устье притока, и зона смешения водных масс перемещается вверх по реке. Так, зимой 1963 г. при сбросах ГЭС более 1.5 тыс. м³/сек. в 3 км выше устья Которосли в ее русле была обнаружена значительная неоднородность воды по вертикали. Судя по электропроводности и ряду других показателей, у дна находились зимние воды Которосли, а в верхней половине вертикали они были на 50% разбавлены волжскими водами. Во время наблюдений вода из лунок начала выливаться на лед. При максимальных в течение суток сбросах Рыбинской ГЭС воды Которосли накапливаются в предустьевом участке реки, практически совсем не поступая в русло Волги. Наиболее значительные объемы вод притока, очевидно, вливаются в водоем в момент спада уровня после резкого сокращения сбросов ГЭС.

Косвенным подтверждением существования периодического характера втекания вод Которосли в водохранилище, связанного с режимом сбросов Рыбинской ГЭС, служат данные по распределению электропроводности воды вдоль волжского судового хода, приведенные на рис.18. Во время интенсивных сбросов воды Рыбинской ГЭС и невысокого стока Которосли ниже ее устья какое-либо повышение электропроводности отсутствует (съемки 16 VI, 18 VII, 3 VIII 1962 и др.). При небольших

сбросах ГЭС ниже устья Которосли хорошо были выражены или общее повышение электропроводности, или отдельные пики, свидетельствующие о поперечной неоднородности потока по электропроводности за счет втекающих в него вод Которосли (съемки 1 VI, 24 VII, 31 VII 1961, 21 VIII 1962 и др.).

При наличии стокового течения в водохранилище вытекающие из Которосли воды смешиваются с Волжской водной массой, и эти трансформированные воды прижимаются к правому берегу водоема. Ширина зоны смешения зависит от соотношения расходов притока и сброса ГЭС (Гделештейн, 1965б). Этот фактор определяет и протяженность зоны смешения. В благоприятные моменты она может простираться узкой полосой вдоль правого берега водохранилища на весьма значительные

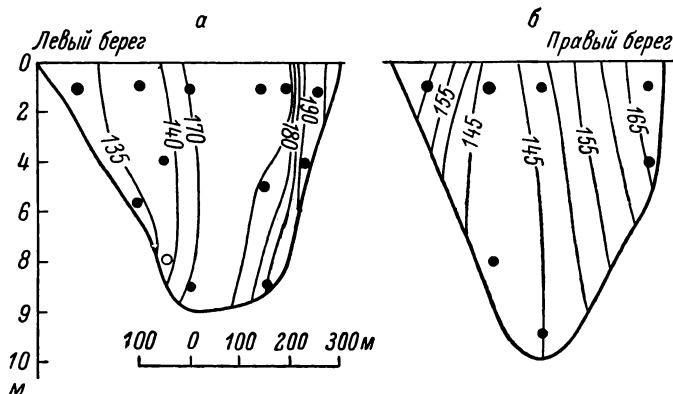


Рис. 20. Распределение электропроводности воды (в мксим./см) по поперечным сечениям водохранилища в 10 км (а) и в 15 км (б) ниже устья Которосли 20 X 1962.

расстояния — до 70 км. Граница между чисто волжскими водами и трансформированными за счет смешения с водной массой Которосли обычно расположена в вертикальной плоскости (рис. 20).

Подобный режим свойствен и остальным приустьевым участкам притоков водохранилища, впадающих выше Костромского расширения, но проявляется он менее ярко из-за небольшого стока прочих рек.

Особенности процесса втекания в водоем и трансформации водных масс притоков озерной части водохранилища наиболее четко выражены в приустьевом заливе Меры. Это неширокий (0.5—1.5 км) и очень извилистый залив с высокими и облесенными берегами. Длина залива 16 км. Глубина в предустьевом участке реки у Павлихи 3—4 м, ниже она увеличивается до 9—11 м у старого устья Меры. В верховьях залива глубина над затопленной поймой в среднем не превышает 1 м; летом этот участок залива сильно зарастает высшей водной растительностью. Ниже по заливу глубина над поймой возрастает до 3—4 м. Морфологические особенности залива препятствуют существенному ветровому воздействию на его воды.

Половодье Меры проходит при уровне в водохранилище на 1.0—2.0 м ниже НПГ, и в ранневесенний период залив интенсивно промывается водами речного половодья. В дальнейшем в результате быстрого подъема уровня в период наполнения водохранилища воды из его открытых частей проникают в залив и как более холодные и плотные подтекают под водную массу Меры. Так, по данным съемки 18 V 1963, воды из русла Волги с электропроводностью 112—126 мксим./см и температурой 10—15° заполняли придонный слой нижнего девятикилометрового участка

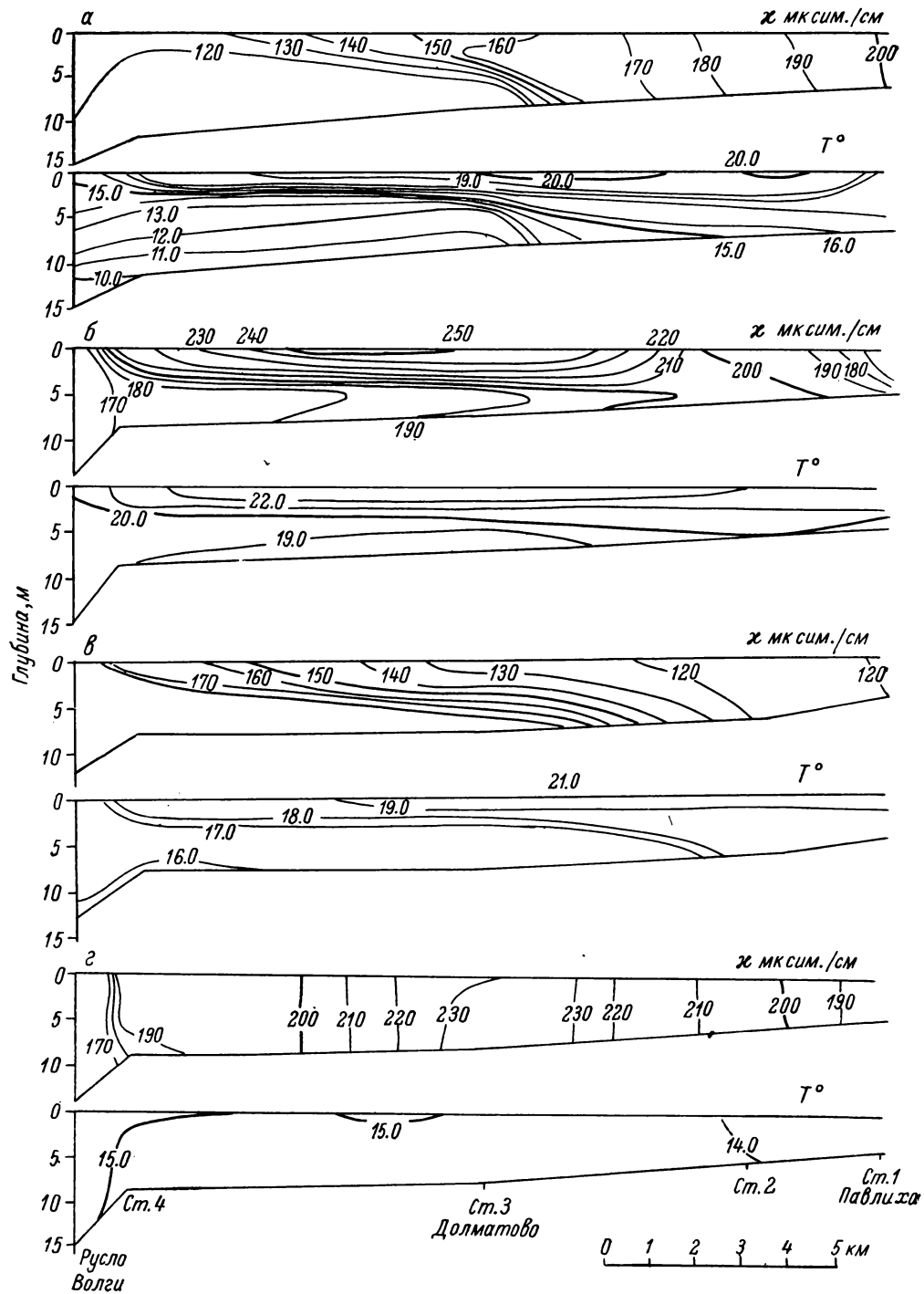


Рис. 21. Продольные разрезы приустьевого залива Меры по электропроводности и температуре воды.

а — 18 V 1963; б — 19 VII 1962; в — 30 VI 1963; г — 31 VIII 1962.

залива. Поверхностный слой нижнего и весь верхний участок занимали прогретые до 21° воды спада речного половодья с электропроводностью 160—200 мксим./см (рис. 21, а). Фронтальный раздел этих водных масс у поверхности проходил примерно в 3 км от бывшего устья, а вверх по заливу постепенно погружался, совпадая со слоем температурного скачка. Блокированные воды половодья Меры, находившиеся в среднем участке залива более полумесяца в мае 1963 г., сильно трансформировались. Внутри этой массы возникла температурная стратификация, уменьшилась ее мутность, прозрачность возросла до 1 м, рН поверхностного слоя стало равно 7.9.

Неоднородность вод залива по вертикали сохраняется обычно до начала осеннего выхолаживания. Придонный слой бывает занят Волжской водной массой; в поверхностном слое, расположенном выше уровня русловых бровок, весенние воды сменяются речными водами с летними значениями показателей. На рис. 21, б показано распределение электропроводности и температуры вод по продольному разрезу залива для момента, когда водная масса Меры имела значения показателей, соответствующие летней межени, а на рис. 21, в — водам дождевого паводка. Слой скачка плотности препятствует смешению водных масс и разделяет легко подвижные речные воды и малоподвижную Волжскую массу.

При наличии в заливе прямой температурной стратификации относительно теплая речная вода весной и в первую половину лета всегда натекает на более холодные и плотные волжские воды, независимо от соотношения величин минерализации обеих масс (рис. 21). Это объясняется тем, что при высоких температурах вертикальный градиент плотности воды, обусловленный температурой, в десятки раз превышает градиент, вызванный различиями водных масс за счет минерализации (табл. 20).

Т а б л и ц а 20

Вертикальные градиенты некоторых характеристик вод металимниона в заливе Меры — плотность воды рассчитана по Бергеру (Berger, 1955)

Дата	Горизонт, м	Градиент температуры, $^{\circ}\text{C}/\text{м}$	Градиент плотности за счет температуры, $10^{-4} \text{ г}/\text{см}^4$	Градиент электропроводности, мксим./см на 1 м	Градиент плотности за счет минерализации, $10^{-8} \text{ г}/\text{см}^4$	Градиент плотности суммарный, $10^{-8} \text{ г}/\text{см}^4$
19 VII 1962	3—4	1.1	220	23	20	200
18 V 1963	2—3	3.5	600	23	20	580
30 VI 1963	5—6	0.5	85	21	18	103

Горизонтальные градиенты электропроводности во фронтальной зоне между водными массами Меры и Волги имели гораздо меньшие значения: 20—50 мксим./см на 1 км, что соответствует градиенту плотности примерно $20—50 \cdot 10^{-11} \text{ г}/\text{см}^4$.

С началом осеннего выхолаживания или при резком похолодании летом, как это было в 1962 г., температурные различия двух водных масс нивелируются и возникают условия для вертикального перемешивания вод в заливе. Происходит смешение двух водных масс и последующее их вытеснение из залива в русло Волги, в результате чего фронт водной массы Меры подходит вплотную к выходу из залива (рис. 21, г). Врды Меры, вытекающие из залива, оказывают ничтожное влияние на трансформацию Волжской водной массы. По нашим наблюдениям в августе 1962 г., полоса шириной в 150 м очень слабо трансформированных вод с электропроводностью всего на 9 мксим./см выше, чем в Волжской

массе, протягивалась, постепенно размываясь, вдоль левого берега водохранилища не более чем на 5—6 км.

Основные особенности процесса втекания и трансформации в приустьевых заливах обследованных нами притоков озерной части водохранилища — Унжи, Немды, Желваты с Надогой, Елнати, Мочи и др. — подобны отмеченным для залива по Мере. Ввиду меньшей извилистости долин других притоков и большему ветровому воздействию на воды заливов в них отсутствовало столь интенсивное натекание речных вод на воды открытых частей водохранилища, как в Мере. Фронтальные зоны, разделяющие водные массы, располагались либо в вертикальной, либо в слабо наклонной плоскости. Скорость продвижения вод по заливам и интенсивность процессов их трансформации были раз-

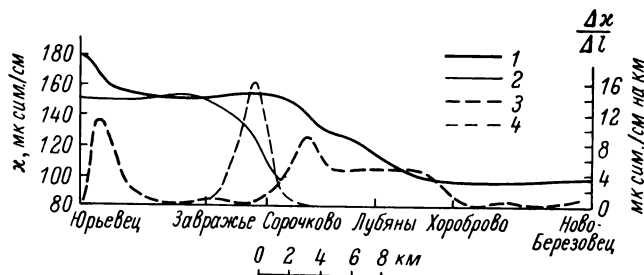


Рис. 22. Изменение электропроводности 20 VII (1) и 1 VIII 1962 (2) и ее горизонтального градиента (3 и 4) в поверхностном слое воды на продольном разрезе приустьевого залива Немды.

личны, что обусловлено главным образом режимом водного стока рек и морфологическими особенностями приустьевых заливов.

Сопоставляя распределение достаточно консервативных показателей водных масс (например, электропроводность или цветность) вдоль продольных осей приустьевых заливов водохранилища с гидрографами соответствующих притоков, удалось ориентировочно определить средние скорости перемещения речных вод в этих заливах. В качестве примера такого рода расчетов рассмотрим перемещение вод паводка в Немденском заливе в последней декаде июля 1962 г. (рис. 22). Нижняя часть залива 20 VII была заполнена летней водной массой водохранилища с электропроводностью 150—155 мксим./см. Верховья залива заполняли воды дождевого паводка Немды, электропроводность которых была равна 96—98 мксим./см. Между Сорочковым и Хоробровым находилась фронтальная зона этих водных масс, протяженность которой была около 8 км. Максимальный горизонтальный градиент электропроводности здесь составлял 9.0 мксим./см на 1 км. С большой долей вероятности можно предположить, что уменьшение электропроводности во фронтальной зоне было вызвано смешением водной массы водохранилища с первыми порциями паводковых вод. Судя по гидрографу стока Немды (рис. 2), воды начальной фазы паводка этой реки прошли замыкающий створ у Селищ 10 VII. Таким образом, с 10 по 20 VII эти воды прошли по руслу Немды расстояние между Селищами и Сорочковым, составляющее 58 км, со средней скоростью 6—7 см/сек. По данным последующей съемки залива, произведенной спустя 11 дней (1 VIII 1962), ядро паводка продвинулось еще на 10 км и подошло к Сорочкову, в то время как фронтальная зона переместилась вниз по заливу на 6 км, приблизилась к Завражью. Следовательно, скорость перемещения первых порций паводковых вод в последующий одиннадцатидневный период сократилась в среднем до 0.7 см/сек.,

а скорость перемещения ядра паводка — до 1.0 см/сек. При этом протяженность зоны смешения водных масс сократилась с 8 до 4.5 км, а максимальный горизонтальный градиент электропроводности возрос до 17.4 мксим./см на 1 км.

В результате подобного анализа перемещения вод дождевого паводка Немды в том же заливе в период между 1 и 9 VII 1963 было также установлено, что с приближением к выходу из залива протяженность фронтальной зоны водных масс сократилась, а максимальная величина горизонтального градиента электропроводности возросла с 10 до 38 мксим./см на 1 км. При этом скорость перемещения ядра паводка была весьма значительной и составляла в среднем 15 см/сек. Такие расчеты были произведены и для Унженского залива. Средние скорости перемещения паводковых вод в верховьях этого залива колебались в пределах 10—20, в низовьях залива они падали до 3—5 см/сек.

Ориентировочные расчеты перемещения вод в приустьевых заливах позволяют составить представление о некоторых общих для всех подобных участков водохранилища чертах динамики водных масс.

1. Скорость перемещения исходных речных водных масс в заливах постепенно уменьшается по мере приближения их к открытым частям водоема. Замедление перемещения вод является следствием постепенного увеличения площади водного сечения заливов от их верховьев к низовьям, а также гидродинамического подпора. Действительно, при сопоставлении скорости перемещения вод спада половодья Унжи в ее приустьевом заливе в 1961 и 1962 гг. оказалось, что при одинаковых расходах реки в замыкающем створе скорость движения воды во втором случае была примерно в 1.5 раза больше, чем в первом. Это было связано с тем, что в 1962 г. уровень воды в открытой части водохранилища у Юрьевца в расчетный период был на 20 см ниже, чем в 1961 г.

2. Интенсивность перемещения речных вод в заливах зависит от расходов притока. Так, скорость перемещения вод в Унженском заливе более высокая и, следовательно, водообмен более интенсивный, чем в приустьевом заливе Немды, что объясняется большей водностью первой реки по сравнению со второй. Кроме того, в одном и том же заливе с увеличением стока реки возрастает и скорость перемещения речных вод, вследствие чего ядра паводков движутся быстрее, чем воды начальных их фаз. Из-за неодинаковых скоростей перемещения различных фаз паводков и подпора протяженность зон смешения водных масс с приближением к низовьям заливов уменьшается, резко возрастают горизонтальные градиенты физических и химических характеристик, что приводит к обострению гидрологического фронта в низовьях приустьевых заливов водохранилища.

Весьма интересно сопоставить интенсивность водообмена крупнейших заливов водохранилища с его водообменом в целом. Так, в июне 1961 и 1962 гг. коэффициент водообмена для всего водоема составлял 0.42 (табл. 16), что означает смену вод в водохранилище в течение 71 суток. По данным нашего расчета, смена вод в заливе Унжи в июне 1961 г. произошла в течение 27, а в заливе Немды в течение 30 суток; в июне 1962 г. в заливе Унжи в течение 17 суток. Таким образом, действительный водообмен заливов в эти периоды был в 2.5—4 раза выше, чем средний для всего водного объема водохранилища.

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДНЫХ МАСС В ОЗЕРНОЙ ЧАСТИ

Перемещение и трансформация водных масс в озерной части водохранилища наиболее интенсивны во время его весеннего наполнения. Достаточно полное представление об особенностях этого процесса дают

материалы наблюдений 1963 г. Первые порции вод весеннего половодья начали поступать в озерную часть водоема из эстуариев рек Унжи и Немды 18—19 IV. Вследствие этого на всех водомерных постах озерной части водохранилища было отмечено начало подъема уровня воды, несмотря на значительно возросшие сбросы Горьковского гидроузла (рис. 23). Наиболее интенсивный подъем уровня (16 см/сутки) наблюдался 21—22 IV, когда несколько сократились попуски Горьковской ГЭС. Максимальные ее сбросы наблюдались 27—29 VI, в среднем за сутки они составляли около 5 тыс. м³/сек. В это время южная половина озерной части водохранилища была заполнена зимней Волжской водной массой, и в нижний бьеф Горьковского гидроузла сбрасывались относительно высоко минерализованные зимние воды. Фронт вод речного половодья, поступавших из заливов Немды и Унжи над левобережной поймой северной половины озерной части водоема, 25 IV подошел к Сокольскому, а к 28 IV сместился к району Пучежа. Зона смешения вод половодья и зимних вод по мере продвижения ее к югу, и особенно проникновения весенних вод в русло Волги у Сокольского, все сильнее размывалась. Ширина этой зоны непрерывно возрастала за счет разбавления зимней водной массы водами половодья и к 2 V охватила всю южную половину озерной части водохранилища. Поскольку в приплотинной части водоема наблюдалась небольшая обратная тем-

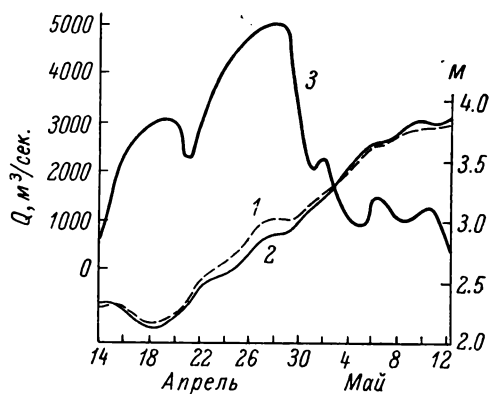


Рис. 23. Изменение уровня воды на водпостах Столпина (1) и Чкаловска (2) и среднесуточных сбросов Горьковской ГЭС (3) весной 1963 г.

пературная стратификация (0.3 у поверхности и 0.5° у дна), натекание маломинерализованных весенних вод на зимние было очень незначительным и обнаруживалось только у Пучежа. На других участках водоема воды были практически полностью однородны по вертикали.

Таким образом, процесс наполнения озерной части водохранилища происходил путем вытеснения зимней водной массы водами половодья из северной в южную приплотинную часть водоема, вследствие чего уровень во всех пунктах озерного участка водохранилища поднимался почти одновременно (рис. 23). Из-за интенсивных сбросов зимних вод и образовавшегося в результате этого сравнительно небольшого уклона вдоль продольной оси озерной части (14 см на 95 км) скорость проникновения вод половодья в приплотинную часть водоема была значительной. Передовые порции вод половодья, поступившие 18—19 IV в Юрьевоцкое расширение, к 1—2 V достигли плотины, т. е. средняя скорость их перемещения составляла 6—7 км/сутки, или 7—8 см/сек. При продвижении они равномерно перемешивались по всей вертикали с отступающими к плотине зимними водами. Для процесса весеннего наполнения большого числа водохранилищ, очевидно, характерно не столько смешение водных масс, сколько вытеснение зимних вод весенними, на что указывают многие исследователи (Кривенцов, 1959; Ершова, 1962; Зенин и Фесенко, 1962).

После окончания весеннего наполнения водохранилища озерная часть его оказывается почти целиком занятой водами речного половодья, перемешавшимися с остатками зимних вод. Уровень водоема к этому времени стабилизируется, а проточность резко уменьшается. В конце

мая 1963 г. из-за пониженной проточности и интенсивного прогрева в условиях жаркой и преимущественно штилевой погоды воды, наполнившие озерную часть водохранилища, стали приобретать черты водной массы озерного типа с характерным для нее термическим расслоением по вертикали и значительной неоднородностью температуры воды по акватории водоема (рис. 24). На отдельных поперечных разрезах температура поверхностных слоев воды над глубоководными участками была

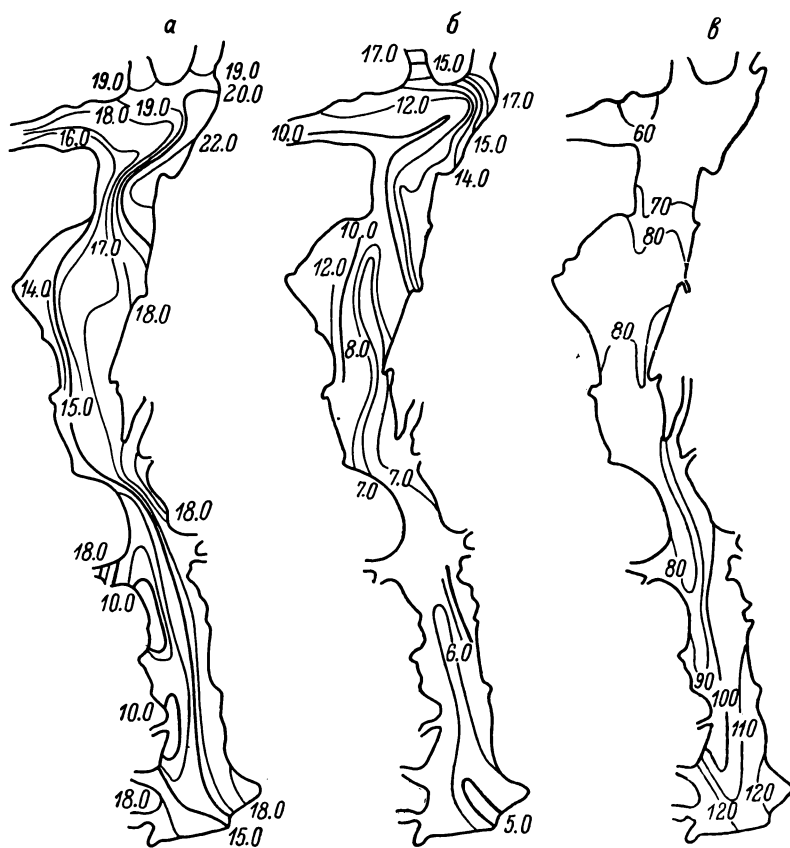


Рис. 24. Распределение температуры в поверхностном (а) и придонном (б) слоях воды 19—22 V и электропроводности в поверхностном слое 23—24 V 1963 (в).

на 7—8° ниже, чем над мелководьями. Такие же резкие температурные контрасты наблюдались и в придонных слоях северной, менее глубоководной части озерного района водохранилища. Более интенсивному прогреву вод в левобережном участке водоема у плотины по сравнению с правобережным способствовала меньшая проточность пойменных участков по сравнению с русловыми, где скорость перемещения вод, а следовательно, и вертикальное перемешивание водной массы были более значительными. Об этом свидетельствует распределение электропроводности воды (рис. 24, в), указывающее на продвижение вод из северной половины озерной части водоема в южную, преимущественно в надрусловом его участке.

Температурное расслоение весенней водной массы водохранилища хорошо видно на рис. 25. В придонных слоях в старом русле Волги температура воды постепенно понижалась от 10 у Юрьевца до 4.3° у пло-

тины. Слой температурного скачка у Юрьевца находился на глубине 6—8 м; к плотине мощность эпилимниона постепенно уменьшалась, около нее слой температурного скачка находится на глубине всего 0—2 м. Температурный градиент в этом слое достигал очень больших значений (5—8°). Плотностное расслоение водной массы водохранилища, препятствовавшее перемешиванию ее по вертикали, создало условия для стра-

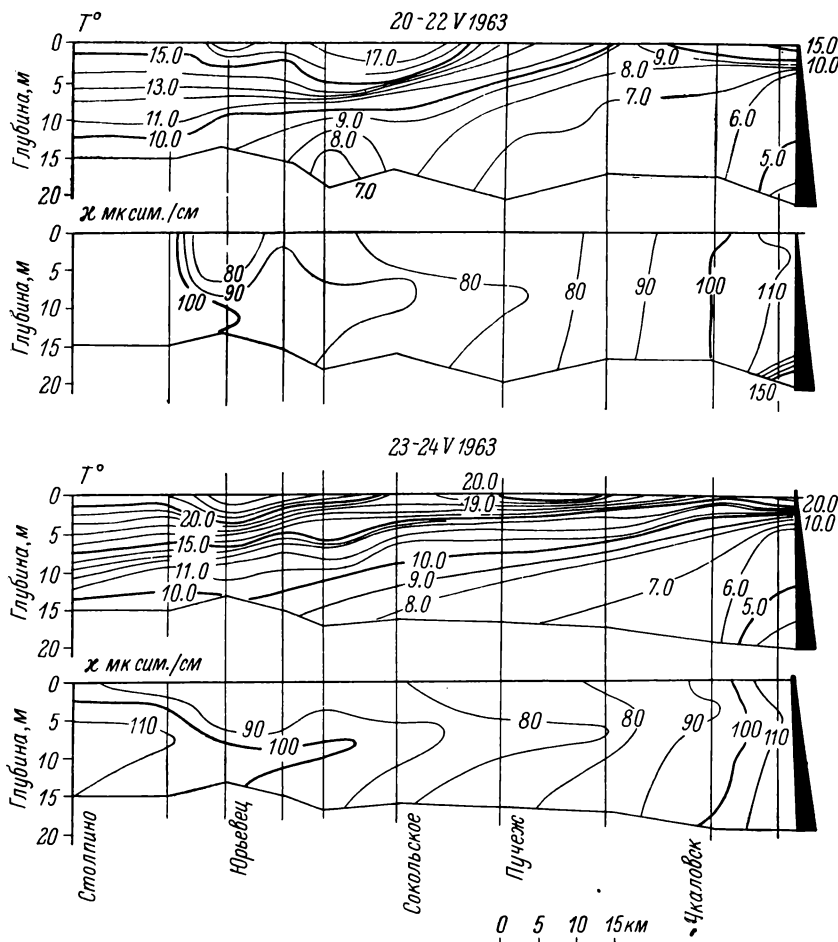


Рис. 25. Продольные разрезы озерной части водохранилища по температуре и электропроводности воды (вдоль затопленного русла Волги).

тификации вод по кислороду: у дна содержание его колебалось в пределах 7—9 мг/л, в эпилимнионе благодаря интенсивному фотосинтезу большого количества фитопланктона содержание кислорода достигало 12—14 мг/л. Такова же причины неоднородности рН водной массы (у дна около 7.0, у поверхности 7.5—8.2).

Температурная стратификация водной массы водохранилища определила своеобразный характер проникновения вод из речной части водохранилища в озерную. Особенно активное продвижение вод происходило непосредственно под слоем скачка, что видно по изгибу изоклапн на продольных разрезах озерной части водоема, представленных на рис. 25. Подтекание вод с повышенной электропроводностью из речной части в Юрьевецкое расширение под слоем скачка наблюдалось нами и на су-

точной станции, выполненной в 4 км к северу-северо-востоку от Юрьевца (рис. 26). В то время как на горизонте 2 м скорости и направление течения имели неустойчивый характер, на глубине 5 м преобладало течение, направленное с запада на восток.

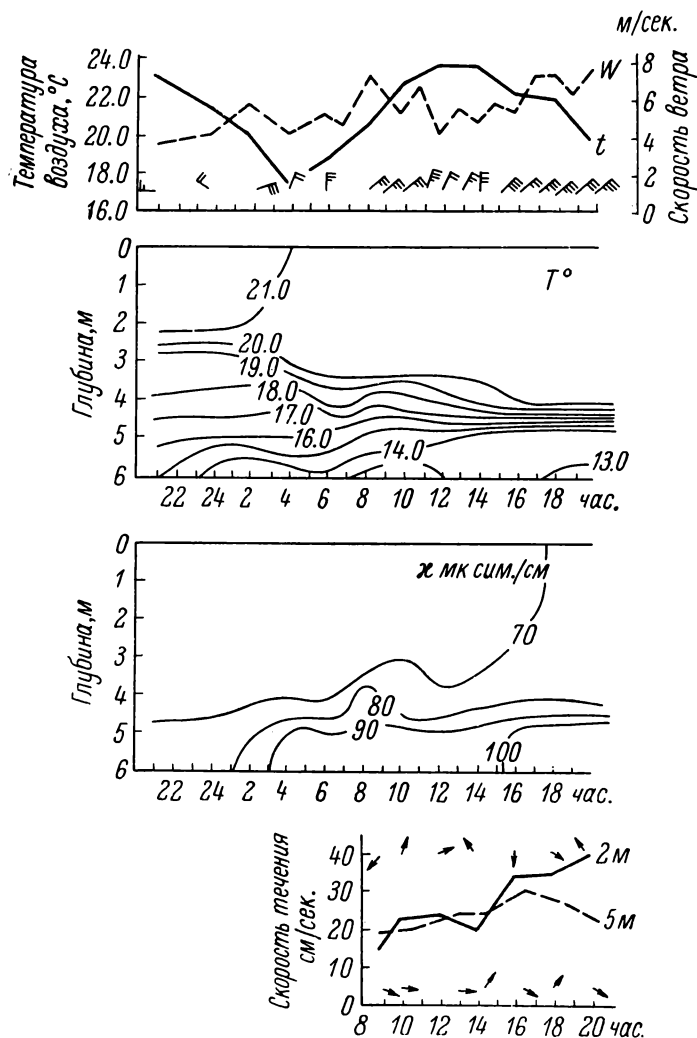


Рис. 26. Изменение температуры воздуха (t), скорости (W) и направления ветра, температуры (T) и электропроводности (χ) воды, скорости и направления течения на глубине 2 и 5 м во время суточной станции в Юрьевском расширении 24—25 V 1963.

В летне-осенний период масса собственно водохранилища, заполняющая озерную часть водоема, имеет черты, свойственные водным массам неглубоких проточных озер, расположенных на окружающей территории. Образующий в период весенне-летнего прогрева слой скачка постепенно погружается до дна и исчезает, а водная масса становится относительно однородной по вертикали как по температуре, так и по кислороду, pH и химизму воды. Прозрачность ее возрастает до 2.0 м. Перечисленные показатели в поверхностных горизонтах имеют суточные периодические изменения в жаркие и штилевые дни. В периоды штормов

водная масса перемешивается до дна, прозрачность ее уменьшается до 1.0—1.5 м за счет взмучивания на мелководьях и поступления оттуда взвесей в открытые части водоема.

В озерном районе водохранилища происходит интенсивное развитие фитопланктона. Доминирующей группой, особенно осенью, здесь являются синезеленые водоросли. В речной части водохранилища концентрация фитопланктона меньшая, чем в озерной; в его составе преобладают диатомовые (Пырина, 1959). По свидетельству А. Д. Приймаченко (1960), приустьевые участки Немды и Унжи отличаются относительной бедностью фитопланктона по сравнению с другими районами водохранилища. Таким образом, имеющиеся в литературе сведения о распределении фитопланктона в Горьковском водохранилище дают основание предположить,

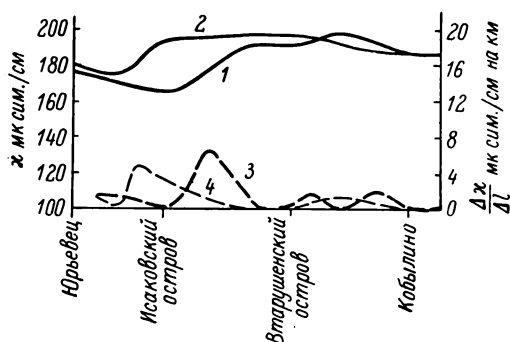


Рис. 27. Электропроводность в 10—12 час. (1) и в 20—21 час (2) 22 VII 1962 и ее горизонтальные градиенты (3 и 4) в поверхностном слое воды на разрезе Юрьево—Кобылино.

а в водной массе водохранилища 0.350—0.470 мг С/л.сутки. Значительные колебания указанных величин в пределах поверхностного слоя водной массы собственно водохранилища были связаны с перераспределением водорослей слабым дрейфовым течением и их преимущественной концентрацией у левого наветренного берега водохранилища.

Перечисленные особенности водной массы, находящейся летом и осенью в приплотинной расширенной части водохранилища, указывают на то, что за счет трансформации поступающих сюда исходных водных масс образуется водная масса озерного типа с присущими ей процессами аккумуляции вещества и энергии. Большую роль в процессах трансформации и накопления вещества в этой водной массе играют биологические факторы, поскольку интенсивность продуцирования органического вещества здесь гораздо большая, чем в исходных водных массах, размещающихся в прочих районах водоема. В периоды, когда на Немде и Унже значительные дождевые паводки отсутствуют, воды в озерной части водохранилища весьма однородны по своим химическим свойствам. При паводках речные воды вторгаются в открытые районы водоема, и тогда в Юрьевоком расширении бывают хорошо выражены зоны смешения этих вод с водной массой собственно водохранилища.

Так, в третьей декаде июля 1962 г. фронт между водной массой собственно водохранилища и меженными водами Унжи проходил в районе Исаковского острова, что видно на рис. 27 по резкому увеличению электропроводности воды на разрезе Юрьево—Кобылино. Путем повторного измерения электропроводности на этом разрезе удалось ориентировочно определить скорость выдвижения фронта унженских вод к центру Юрье-

во, что основные его водные массы могут иметь различный уровень первичного продуцирования. Для проверки этого предположения, 9 V 1963 мы выполнили гидрологическую съемку Юрьевоцкого расширения с одновременным определением первичной продукции радиоуглеродным методом (Сорокин, 1956). В районе, охваченном наблюдениями, в это время находились летняя Волжская водная масса, паводковые воды Унжи и летняя водная масса собственно водохранилища. Величина первичной продукции в первой из них составляла 0.110—0.160, в речных водах 0.215,

вецкого расширения. За 10 час. 22 VII этот фронт с максимальным градиентом электропроводности 5—6 мксим./см на 1 км продвинулся к западу на 6 км (рис. 27) со средней скоростью около 17 см/сек. Такие относительно высокие для этой части водоема скорости, видимо, объясняются двумя причинами. Одной из причин, вызвавшей продвижение вод к западу, являлось дрейфовое течение, связанное с дувшим в эти часы северо-восточным ветром силой 4—5 м/сек. Однако наблюдения, проведенные на суточной станции 22—23 VII 1962 в центре Юрьевоцкого расширения, показали, что подобный ветер может вызвать дрейфовое течение в этом районе со скоростью не выше 10—12 см/сек. Второй возможной причиной относительно высокой скорости продвижения фронта могло являться увеличение скорости стокового течения в Унженском заливе, которое должно было произойти в связи с появлением в верховьях этого залива вод дождевого паводка.

Практически неизменная величина горизонтального градиента электропроводности при перемещении фронта указывает на то, что продвижение унженских вод происходило путем вытеснения и замещения одной массы водохранилища, а не в результате смещения или натекания одной водной массы на другую. Это было связано с тем, что плотности вод обеих масс имели примерно одинаковые значения. К 31 VII передовые воды паводка Унжи достигли Кобылина, пройдя по Унженскому заливу 45 км за 10 дней со средней скоростью 5.2 см/сек. В последующие 20 дней фронт паводковых вод Унжи оставался на одном месте, в районе Втарушенского острова, так как залив полностью аккумулировал объем паводка и проточность его резко понизилась из-за невысокого стока Унжи в августе 1962 г.

Вторым примером, характеризующим динамику водных масс в Юрьевоцком расширении, могут служить материалы июльского рейса 1963 г. К 8 июля ядро паводка Унжи достигло Втарушенского острова, а фронт этой водной массы переместился к Исаковскому острову (рис. 28). Средняя скорость перемещения вод Унжи составила за неделю 2.7 км/сутки. Фронт паводка Немды выдвинулся южнее Завражья, но скорость его перемещения была значительно ниже, чем унженских вод. В последующие сутки воды обеих рек заполнили всю пойменную центральную часть Юрьевоцкого расширения. Наибольшая скорость их продвижения, судя по изолиниям электропроводности (рис. 28), наблюдалась над старым руслом Унжи, где она составляла 2—3 км/сутки. В течение следующих суток скорость перемещения Унженской водной массы сохранилась примерно такой же. В результате интенсивного втекания речных вод у бровки затопленного русла Волги непрерывно возрастал горизонтальный градиент электропроводности, который утром 10 VII достиг 20 мксим./см на 1 км. Увеличение горизонтальных градиентов во фронтальной зоне и вертикальная однородность вод в ней, как и в предыдущем примере, указывают на то, что мы были свидетелями процесса вытеснения паводковыми водами водной массы, занимавшей ранее этот район водохранилища.

Итак, рассмотренные нами примеры перемещения водных масс в заливах и открытых частях Горьковского водохранилища свидетельствуют о том, что процесс замещения одних водных масс другими происходит путем вытеснения при условии термической однородности вод по вертикали. При наличии температурной стратификации наблюдается подтекание или натекание новой водной массы на старую. По-видимому, в мало минерализованных в общем водах, к которым относятся все весенние и летне-осенние водные массы водохранилища, плотностные различия между отдельными массами за счет минерализации не настолько велики, чтобы в условиях гомотермии могло возникнуть натекание менее минерализо-

ванной водной массы на более минерализованную. При большей минерализации вод и низких температурах различия в плотности водных масс за счет их химизма относительно увеличиваются, что приводит к натеканию одних вод на другие, как это имеет место зимой в Горьковском водохранилище.

О стабильности фронтальной зоны, скорости ее перемещения и интенсивности процесса смешения вод различного генезиса в ее пределах можно

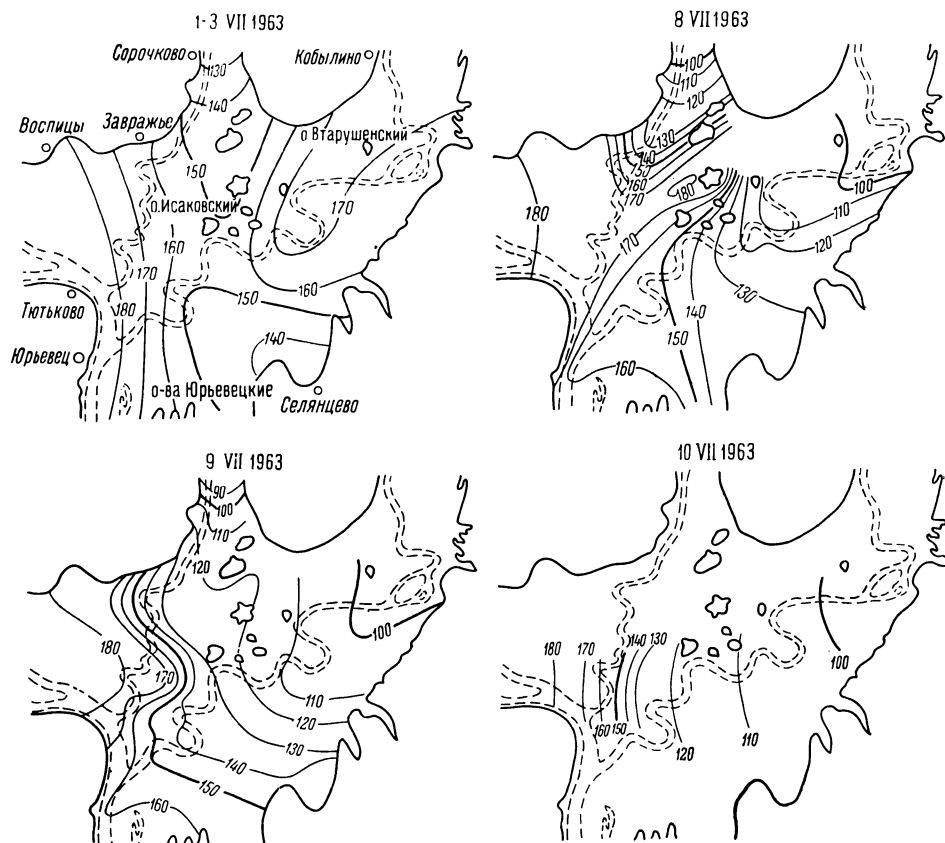


Рис. 28. Распределение электропроводности (мксим./см) в поверхностном слое воды в Юрьевском расширении.

судить по величине максимального градиента любого репрезентативного показателя. Наибольшей скоростью перемещения и значительной интенсивностью процесса смешения характеризуются, так сказать, «лобовые» участки фронта, ограничивающие передовые порции движущейся водной массы. Эти участки фронта чаще всего сильно размыты, горизонтальные градиенты показателей невелики (по электропроводности, например, от 4—5 до 18—20 мксим./см на 1 км). Более стабильны и устойчивы «боковые» участки фронта водной массы, внедрившейся в другую массу. На таких мало подвижных участках фронтальной зоны интенсивность смешения водных масс мала, а горизонтальные градиенты электропроводности имеют большие значения, достигая в отдельных случаях в озерной части водохранилища 160 мксим./см на 1 км, а в речной, где скорости течения выше, 60 мксим./см на 100 м, т. е. 600 мксим./см в пересчете на 1 км (рис. 20). Еще большей стабильностью и устойчивостью к перемешиванию обладают зоны контакта водных масс, расположенных одна под другой. Вертикаль-

ные градиенты электропроводности в этих участках фронтальной зоны достигают иногда 20—30 мксим./см на 1 м, т. е. 50—100 и более раз больших величин, чем горизонтальные градиенты. Для сравнения приведем несколько значений максимальных градиентов отдельных показателей во фронтальных зонах крупных озер. Так, по материалам гидрологических съемок оз. Гурон (Ayers et al., 1956), можно заключить, что наибольший из наблюдавшихся на озере горизонтальных градиентов электропроводности составлял 14 мксим./см на 1 км (в устье залива Saginaw bay 29 VI 1953). На Байкале наблюдались значительно более высокие горизонтальные градиенты между озерными и селенгинскими водами — 0.24—0.30 мг-экв./л на 100 м (Вотинцев и др., 1963), что примерно эквивалентно 200—300 мксим./см на 1 км.

Заключение

В результате трехлетних лимнологических исследований Горьковского водохранилища установлено существование обособленных водных масс в водоеме, характеризующемся сравнительно интенсивным водообменом. Как и в менее проточном Рыбинском водохранилище, воды Горьковского водохранилища, сформировавшиеся в определенных физико-географических условиях, имеют устойчивый комплекс физических и химических показателей и ежегодно заполняют одни и те же сравнительно легко оконтуриваемые районы водоема. Не останавливаясь более на региональных особенностях водных масс Горьковского водохранилища, их динамики и трансформации, подробно рассмотренных в работе, мы сделаем попытку выделить некоторые основные закономерности, являющиеся, по нашему мнению, общими для большинства равнинных водохранилищ средней полосы европейской территории Советского Союза.

1. В водохранилищах следует различать два типа водных масс — речные и озерные. Первые из них формируются на водосборах притоков водохранилища и, попадая в него, некоторое время сохраняют присущие им свойства, зависящие в основном от физико-географических особенностей бассейнов. Между отдельными показателями речных водных масс могут быть установлены коррелятивные зависимости, обусловленные характером процессов их формирования на водосборах. Отличительными признаками этих масс являются, во-первых, однородность большинства их характеристик по вертикали, что связано с относительно интенсивным постоянным перемешиванием этих вод стоковыми течениями. Во-вторых, речные водные массы характеризуются значительной изменчивостью величин своих показателей, которая определяется внутригодовой сменой преобладающего типа питания вод. Таким образом, речная водная масса складывается из непрерывно чередующихся разнокачественных объемов вод, которые можно рассматривать как отдельные ее модификации. Наиболее контрастны последние в малых реках, границы между модификациями водных масс больших рек часто бывают расплывчаты.

Речные водные массы являются первичными, исходными, из которых в процессе трансформации в водоеме образуются вторичные водные массы озерного типа. Важнейшей особенностью последних следует считать свойственный им процесс аккумуляции вещества и энергии, присущий водоемам замедленного водообмена (Россолимо, 1964). Одним из наиболее существенных факторов и в то же время признаков такой аккумуляции служит более или менее продолжительная термическая и плотностная стратификация озерных масс, а также повышенное по сравнению с речными водами продуцирование органического вещества. Длительность существования в водохранилище водной массы озерного типа зависит от интенсивности его водообмена. В слабо проточном водохранилище го-

дичного или многолетнего регулирования (например, в Рыбинском) его собственная водная масса существует в течение всего года, постепенно обновляясь за счет исходных водных масс. В более проточных водохранилищах сезонного регулирования стока типа Горьковского озерная водная масса существует только часть года, в период наименьшего их водообмена. Она ежегодно возникает весной, после пропуска гидроузлом половодья, и замещается свежими водами исходных масс в периоды повышенного водообмена.

2. Характер процесса замещения одних вод другими в водохранилище зависит от соотношения и вертикального распределения плотности водных масс. В условиях однородного распределения этой характеристики наблюдается вытеснение старой водной массы вновь пришедшей в водоем. В тех случаях, когда воды неоднородны по плотности, имеет место подтекание либо натекание одной водной массы на другую. Летом при сравнительно высокой температуре воды натекание в водоемах малой и средней минерализации возможно только при наличии температурной стратификации независимо от концентрации солей в соприкасающихся водных массах. При температурах воды, близких к 4° , этот процесс может происходить даже при почти однородной температуре из-за различной минерализации соседних масс. Как показали наблюдения, индикатором интенсивности перемещения водных масс и их смешения могут служить величины максимальных градиентов гидрологических характеристик в их фронтальной зоне.

3. В равнинных водохранилищах, которые в подавляющем большинстве сравнительно мелководны, активно протекают процессы трансформации водных масс, проявляющиеся в существенном изменении их первоначальных физических, химических и биологических свойств. Основными факторами трансформации водных масс являются проточность, морфометрические особенности чаши и метеорологический режим водоемов, а также биохимические и биологические процессы. Существуют, по-видимому, два основных типа трансформации водных масс водохранилищ: фронтальная и внутримассовая. Первая из них происходит в пределах фронтальных зон соприкасающихся водных масс, где ведущим процессом является смешение этих масс, их взаимное разбавление. Роль главных факторов во фронтальной трансформации играют стоковые и ветровые течения. Под внутримассовой трансформацией мы подразумеваем процесс изменения характеристик внутри одной и той же водной массы под воздействием главным образом гидрометеорологических и биологических факторов. И та и другая трансформация может быть частичной, если только часть показателей водной массы претерпевает изменение, либо сравнительно незначительно изменяется весь комплекс ее показателей. Кроме того, в водохранилищах наблюдается и полная трансформация вод, когда свойства последних изменяются настолько, что можно говорить о возникновении качественно новой водной массы. Примером такой трансформации служит процесс формирования озерной водной массы собственно водохранилища из одной или нескольких исходных масс.

4. Размещение основных водных масс в пределах водохранилища определяется главным образом соотношением поступающих в него объемов исходных масс. Поскольку водосборы притоков рассматриваемых водоемов, как правило, имеют примерно одинаковые климатические и орографические условия формирования стока, соотношение объемов исходных водных масс равнинных водохранилищ относительно постоянно и почти не зависит от водности года. Поэтому особенности размещения отдельных водных масс в водохранилище в различные фазы гидрологического режима повторяются из года в год. Это обстоятельство может служить предпосылкой для использования водных масс в качестве основы

географо-гидрологического районирования водохранилища, так как они отражают не только качественную специфику вод различного происхождения, но и динамические, морфометрические, метеорологические и биологические особенности отдельных частей водоема. Такое районирование облегчит разработку принципов прогнозирования качества воды внутри водохранилищ. Распространенные в настоящее время балансовые методы прогноза качества воды в водохранилищах не могут полностью удовлетворить запросы народного хозяйства, так как для решения проблемы водоснабжения, сбросов и очистки сточных вод и т. д. необходимы прогнозы физических, химических и биологических свойств воды не столько по всему водоему в целом, сколько в отдельных его районах.

Успеху дальнейших исследований водных масс водохранилищ, по нашему мнению, должны способствовать, во-первых, модернизация техники гидрологических съемок водоемов, во-вторых, включение в число показателей водных масс биологических индикаторов. Совершенствование методики наблюдений возможно путем оборудования экспедиционных судов комплексными самописцами, регистрирующими по ходу судна ряд важнейших показателей водных масс (температуру, электропроводность, оптические характеристики, содержание кислорода и некоторые другие). Это позволит резко сократить продолжительность съемок и значительно точнее определять границы, а следовательно, и объемы водных масс. Включение в число показателей водных масс биологических индикаторов обеспечит более комплексную характеристику свойств вод и будет способствовать познанию закономерностей распределения в водохранилищах водных организмов.

ЛИТЕРАТУРА

- А г е н о р о в В. К. 1944. Об основных водных массах в гидросфере. Тр. Н.-иссл. учреждений ГМС, сер. V, вып. 10, М.
- А л е к с и н О. А. 1954. Химический анализ вод суши. Гидрометеониздат, Л.
- А н т и п о в а О. П. 1961. Основные сведения о существующих, строящихся и проектируемых водохранилищах СССР, Изв. Гос. н.-иссл. инст. озерн. и речн. хоз., т. 50.
- А р м а н д Д. Л. 1955. Происхождение и типы природных границ. Изв. Всес. геогр. общ., т. 87, вып. 3.
- Б а л а г у р о в М. 1957. Опыт эксплуатации волжского каскада. Матер. н.-техн. совещ. по работе гидростанций в каскаде, вып. 1, Запорожье.
- Б е л ы х Ф. И. 1959. О точности определения расхода на Рыбинском гидроузле. Сб. работ Рыбинской гидромет. обсерватории, вып. 1.
- Б р а с л а в с к и й А. П., Р. Ф. Б ю р и г и З. А. В и к у л и н а. 1951. Водный баланс Рыбинского водохранилища. Тр. Гос. гидрол. инст., вып. 11, Л.
- Б у т о р и н Н. В. 1963. Формирование гидрологического режима Горьковского водохранилища (1955—1959). Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 5.
- Б у т о р и н Н. В. 1965а. О водных массах континентальных водоемов. В сб.: Динамика водных масс водохранилищ, изд. «Наука», М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В. 1965б. Синхронные гидрологические съемки Рыбинского водохранилища. В сб.: Динамика водных масс водохранилищ, изд. «Наука», М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В. 1965в. К изучению водных масс Рыбинского водохранилища. В сб.: Динамика водных масс водохранилищ, изд. «Наука», М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В. и Т. Н. К у р д и н а. 1965. Характеристика гидрологических сезонов Рыбинского водохранилища. В сб.: Биологические процессы во внутренних водоемах, изд. «Наука», М.
- Б у т о р и н Н. В. и А. С. Л и т в и н о в. 1962. Опыт применения самописца течений Ю. К. Алексеева для изучения скоростного режима водохранилищ. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 2.
- Б ю р и г Р. Ф. 1950. Приток и сток Рыбинского водохранилища. Тр. Гос. гидрол. инст., вып. 7, Л.
- В о р о н к о в П. П. 1963. Гидрохимическое обоснование выделения местного стока и способ расчленения его гидрографа. Метеорология и гидрогеология, № 8.
- В о т и н ц е в К. К., Г. И. П о п о в с к а я и Г. Ф. М а з е п о в а. 1963. Физико-химический режим и жизнь планктона Селенгинского района озера Байкал. Тр. Лимнолог. инст. СО АН СССР, т. 7, М.

- Г а л а к т и о н о в а Т. Г. 1964. Минерализация и общая жесткость речных вод на территории Верхне-Волжского управления Гидрометслужбы. Сб. работ Горьковской гидромет. обсерватории.
- Д у б р о в и н Л. И., Ю. М. М а т а р з и н и И. А. П е ч е р к и н. 1959. Камское водохранилище. Пермь.
- Е л и с е е в А. И. 1965. Изменение скоростного режима в зоне подпора Волгоградской ГЭС. В сб.: Динамика водных масс водохранилищ, изд. «Наука», М.—Л.
- Е р ш о в а М. Г. 1962. О распространении талых вод в Рыбинском водохранилище перед его вскрытием. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 13.
- Е р ш о в а М. Г. 1965. Распределение вод различного происхождения в Рыбинском водохранилище в весенний период. В сб.: Динамика водных масс водохранилищ, изд. «Наука», М.—Л.
- Е р ш о в а М. Г. 1967. Водные массы Череповецкого водохранилища. В сб.: Биологические и гидрологические факторы местных перемещений рыб, изд. «Наука», М.—Л.
- Е р ш о в а М. Г. и К. К. Э д е л ь ш т е й н. 1966. О методике измерения электропроводности водных масс волжских водохранилищ. В сб.: Планктон и бентос внутренних водоемов, изд. «Наука», М.—Л.
- З е н и н А. А. 1961. Неоднородность состава волжской воды и процессы смешения ее водных масс. Гидрохим. материалы, т. 31.
- З е н и н А. А. 1964. Гидрохимический режим Горьковского водохранилища. Гидрохим. материалы, т. 36.
- З е н и н А. А. 1965. Гидрохимия Волги и ее водохранилищ. Гидрометеиздат, Л.
- З е н и н А. А. и Н. Г. Ф е с е н к о. 1962. Некоторые вопросы динамики водных масс больших русловых водохранилищ. Тр. зональн. совещ. по типол. и биол. обоснованию рыбохоз. использования водоемов южной зоны СССР, Кишинев.
- З и м и н о в а Н. А. 1959. Элементы гидрологического режима и водный баланс Ивановского водохранилища за 1951—1956 гг. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2.
- К а в ч у к В. Н. и Н. А. Я р о с л а в ц е в. 1964. Расчет суточного бокового притока в Горьковское водохранилище. Сб. работ Горьковской гидрометеорологической обсерватории.
- К р и в е н ц о в М. И. 1959. К вопросу о прогнозе химического состава воды водохранилища. Тр. III Всес. гидр. съезда, т. 10.
- К у р д и н а Т. Н. 1959. Элементы гидрологического режима и водный баланс Угличского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2.
- Л а п и ц к и й И. И. 1961. Цимлянское водохранилище. Изв. Гос. н.-иссл. инст. озерн. и речн. хоз., т. 50.
- М а к е е в Д. Б. 1961. Днепродзержинское водохранилище. Изв. Гос. н.-иссл. инст. озерн. и речн. хоз., т. 50.
- М о р и ч е в а Н. П. 1965. Карбонатно-кальциевое равновесие в воде р. Волги и ее водохранилищ. В кн.: А. А. З е н и н. Гидрохимия Волги и ее водохранилищ. Гидрометеиздат, Л.
- М у р а в е й с к и й С. Д. 1960. О некоторых важных положениях биогидрологии. В сб.: Реки и озера, Географиз, М.
- М у р о м ц е в А. М. 1953. Классификация подразделений Мирового океана и его районирование. Изв. Всес. геогр. общ., т. 85, вып. 2.
- Н е п о р о ж н и й П. С. и А. Л. Ф и л а х т о в. 1960. Опыт строительства гидроузлов. Изд. АН УССР, Киев.
- Н и к и т и н А. Ф. 1905. Вода Волги и Оки у Нижнего Новгорода и двенадцати волжских притоков. Вестн. обществ. гигиены, судебн. и практ. медицины, октябрь, СПб.
- П о д г о р н ы й Л. Н. и А. В. Ф о т и е в. 1958. Методика анализа маломинерализованной воды с применением катиона КУ-2. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 2.
- П р и й м а ч е н к о А. Д. 1960. Состав и основные закономерности распределения биомассы фитопланктона в водохранилищах равнинных рек СССР. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 3.
- П ы р и н а И. Л. 1959. Фотосинтетическая продукция в Волге и ее водохранилищах. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 3.
- Р о с с о л и м о Л. Л. 1964. Основы типизации озер и лимнологического районирования. В сб.: Накопление вещества и энергии в озерах, изд. «Наука», М.
- Р у т к о в с к и й В. И. 1963. Электропроводность, температура и распределение водных масс в Горьковском и Куйбышевском водохранилищах. Матер. I н.-техн. совещ. по изучению Куйбышевского водохр., вып. 1.
- Р у т к о в с к и й В. И. и Т. Н. К у р д и н а. 1959. Водный баланс Рыбинского водохранилища за период с 1947 по 1955 г. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 1.

- С о р о к и н Ю. И. 1956. О применении радиоактивного углерода C^{14} для изучения первичной продукции водоемов. Тр. Всес. гидробиол. общ., т. 7.
- Г и х и й М. М. 1959. Этапы изучения и рыбохозяйственного освоения водохранилищ СССР. Тр. VI совещ. по проблемам биол. внутр. вод СССР. Изд. АН СССР, М.—Л.
- 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.
- Ц е б Я. Я. 1962. О некоторых закономерностях формирования гидробиологического режима Каховского водохранилища. Тр. зональн. совещ. по типол. и биол. обоснованию рыбовод. использования водоемов южной зоны СССР, Кн. шинев.
- Ш и р о к о в В. М. 1961. Гидрологический режим ряда заливов Куйбышевского водохранилища, образовавшихся в устьях малых рек. Изв. Казанск. фил. АН СССР, сер. энерг. и вод. хоз., вып. 3.
- Э д е л ь ш т е й н К. К. 1963. О слое температурного скачка и его динамике в Рыбинском водохранилище. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 6, М.—Л.
- Э д е л ь ш т е й н К. К. 1965а. Водные массы озерной части Горьковского водохранилища. В сб.: Динамика водных масс водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 9.
- Э д е л ь ш т е й н К. К. 1965б. Динамика водной массы речной части Горьковского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 9.
- Э д е л ь ш т е й н К. К. 1966. Водные массы Горьковского водохранилища. Вестн. МГУ, сер. геогр., № 1.
- Э д е л ь ш т е й н К. К. 1967. Процесс водообмена Горьковского водохранилища. В сб.: Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах, изд. «Наука», М.
- Я к о в л е в а А. Н. 1961. Саратовское водохранилище. Изв. Гос. н.-иссл. инст. озерн. и речн. хоз., т. 50.
- Я р о с л а в ц е в Н. А. 1961. Течения и перемещения наносов в прибрежной зоне Горьковского водохранилища. Тр. VII Байкальского коорд. научн. совещ. по изучению берегов водохр., т. 1, М.
- Я р о с л а в ц е в Н. А. 1965. Уровенный режим озерной части Горьковского водохранилища. Сб. работ по гидрологии, № 5, Гидрометеиздат, Л.
- A y e r s I. C., A n d e r s o n D. V., C h a n d l e r D. C., L a u f f G. H. 1956. Currents and water masses of Lake Huron. Publ. Gr. Lakes. Res. Inst., № 1.
- B e r g e r F. 1955. Die Dichte natürliche Wasser und Konzentrationsstabilität in Seen. Arch. f. Hydrobiol., Suppl. Bd. XXII, H. 3/4, Stuttgart.
- P l e i s s e n e r M., 1909. Über die Messung und Registrierung des electrischen Leitvermögens von Wassern mit Hilfe von Gleichstrom. Arbeit aus dem Kaiserl. Gesundheitsamte, Bd. XXX, Berlin.
-

О ТРАНСФОРМАЦИИ ВОЛЖСКИХ ВОД В ИВАНЬКОВСКОМ И УГЛИЧСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩАХ

А. П. Щербаков (1950) показал, что под влиянием Иваньковского и Угличского водохранилищ некоторые характеристики волжских вод заметно изменились. Это прежде всего выразилось в том, что отдельные резкие колебания химического состава волжской воды сгладились. Так, большой осенний паводок 1940 г. не вызвал ожидаемого значительного минимума жесткости, а нарастание минерализации после паводочного минимума проходило значительно медленнее, чем до сооружения Иваньковского и Угличского водохранилищ. Произошел некоторый сдвиг в гидрохимических характеристиках волжской воды.

Изучение роли Иваньковского и Угличского водохранилищ в изменении физических характеристик волжской воды связано с работами В. И. Рутковского (1962, 1964). Используя результаты скоростной съемки, этот автор попытался проследить изменения температуры по ходу движения волжских вод в пределах этих водохранилищ, а с помощью определения электропроводности выяснить некоторые вопросы динамики вод. Продолжая исследования предыдущих авторов, мы особое внимание обратили не только на изменение свойств волжской воды, но и на наличие водных масс различного происхождения в этих водоемах, на особенности их перемещения.

На примере Рыбинского водохранилища нами было показано, что наиболее четко различия между отдельными водными массами прослеживаются весной (Рыбопромысловый атлас Рыбинского водохранилища, 1963; Буторин, 1965а, 1965б). В связи с этим на первом этапе изучение водных масс Иваньковского и Угличского водохранилищ ограничивалось в основном весенним периодом, и лишь в 1966 г. была выполнена скоростная съемка, характеризующая состояние вод в первой половине августа.

Таким образом, основу настоящей работы составляют материалы скоростной съемки водохранилищ, выполненной под руководством В. И. Рутковского в июне 1961 г., июньской и июльской съемок 1963 г. А. С. Литвинова, августовской скоростной съемки 1966 г., проведенной И. С. Ильиным, и эпизодические измерения характеристик вод, полученных в комплексных и гидрологических рейсах. Методика работ по измерению температур и электропроводности описана у В. И. Рутковского (1964), а по измерению течений у А. С. Литвинова (1966).

ИВАНЬКОВСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Геоморфологические особенности затопленной территории определили довольно сложную конфигурацию водохранилища. Площадь зеркала его при НПУ составляет 327 км², а общий объем воды 1.12 км³. Средняя глубина водохранилища 3.4 м. Наполнение и питание водоема происхо-

дит за счет стока Волги и боковых притоков. По объему годового стока Волга стоит на первом месте и дает 56.6%, а вместе с Тверцой 82% от общего притока в водохранилище (Зиминова, 1959).

Преобладающая роль Волги в формировании водных масс водохранилища сохраняется и в весенний период, но материалы скоростных съемок показывают, что в это время собственно волжской водой заполнен лишь участок Волги до Калинина. В середине июня 1961 г. средние температуры ее на русловых вертикалях в пределах Калинина и выше составляли 23.1—23.2°, а электропроводность колебалась около 150 мксим./см.

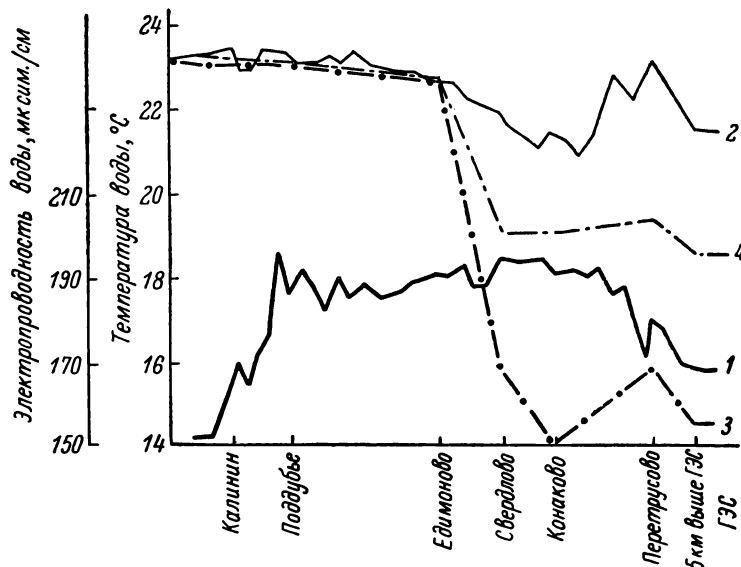


Рис. 1. Изменение температуры и электропроводности по длине Иваньковского водохранилища 13—15 VI 1961 (по В. И. Рутковскому).

1 — средняя электропроводность на русловых вертикалях; 2 — температура поверхностного слоя воды; 3 — температура придонного слоя воды; 4 — средняя температура на русловых вертикалях.

Высокая температура воды сохранялась и ниже Калинина, практически до Единово. Наличие проточности обеспечивает на этом участке полную однородность водной массы как по вертикали, так и по протяженности участка: разность температуры воды в поверхностном горизонте на русловых вертикалях составляла всего лишь 0.6° (Рутковский, 1964). Однако в отличие от температуры электропроводность воды испытывала существенные изменения. Особенно резкое изменение ее наблюдалось между Калинином и Поддубьем. В этом районе, вероятно под влиянием сточных промышленных вод, электропроводность заметно повышается. Ее значения увеличиваются от 150 выше Калинина до 190 мксим./см в районе Поддубья, причем повышение электропроводности происходит во всей толще воды от поверхности до дна. Следовательно, уже при втекании в Иваньковское водохранилище волжские воды начинают трансформироваться. В результате трансформации волжских вод образуется водная масса, отличающаяся от исходных вод Волги и Тверцы повышенной электропроводностью и заполняющая верхний участок водохранилища от Калинина до Единово.

При дальнейшем перемещении этой водной массы к плотине характеристики ее не остаются постоянными. Прежде всего на участке Единово—Свердлово происходит резкое понижение температуры (рис. 1).

Еще при изучении температурного режима Рыбинского водохранилища В. И. Рутковский (1963) отметил, что наиболее резкое изменение температуры весной свойственно участкам водоема, на которых происходит смешение теплых речных вод с холодными водами центральной части. Позднее нами (Рыбопромысловый атлас Рыбинского водохранилища, 1963, 1964, 1965б) и К. К. Эдельштейном (1965) было показано, что резкое изменение характеристик среды свойственно зоне соприкосновения различных водных масс. Наиболее вероятно, что и в данном случае между Едимоновом и Свердловом проходит зона смешения теплых, относительно высоко-

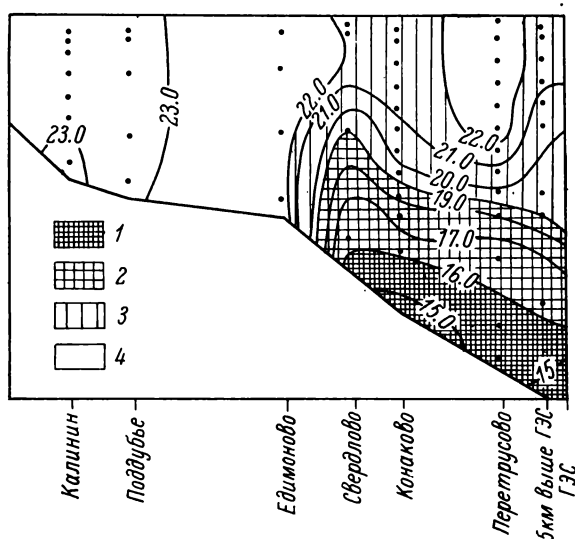


Рис. 2. Продольный температурный разрез Иваньковского водохранилища (по В. И. Рутковскому).

1 — от 13 до 16°; 2 — от 16 до 19°; 3 — от 19 до 21°; 4 — от 21 до 24°.

по вертикали, причем электропроводность поверхностных вод была несколько выше, чем придонных. Такое распределение электропроводности подтверждает предположение, что в данном районе происходит соприкосновение вод, имеющих различные свойства. Наиболее вероятная картина их взаимодействия следующая: водная масса верхнего участка водохранилища с температурой около 23° и электропроводностью порядка 190 мксим./см при своем перемещении натекает на относительно холодные и менее минерализованные придонные воды приплотинной части водоема. Последние представляют собой частично трансформированные воды весеннего половодья, температура которых 15—16°, а электропроводность порядка 170—180 мксим./см.

Наличие такой водной массы в водохранилище объясняется следующим образом. В период весеннего наполнения водоема в него поступают слабо-минерализованные воды половодья. Температура их обычно около 11° (Рутковский, 1964; Буторин, 1965б). При небольшом объеме водохранилища эти воды практически составляют его основную массу, так как зимние воды в период наполнения водоема полностью вытесняются, а роль боковой приточности в расширенной части водохранилища ничтожна. К концу весеннего половодья в водохранилище поступают более прогретые воды, минерализация которых заметно увеличивается. Постепенно

минерализованных вод верхнего участка водохранилища с холодными придонными водами приплотинной части, наличие и расположение которых по температуре хорошо видно на рис. 2. Понижение температуры воды в поверхностных и придонных горизонтах продолжалось и на участке водохранилища от Свердлова до Канаво, а после некоторого повышения ее в районе Перетрусова прослеживалось до плотины Иваньковской ГЭС.

Изменения электропроводности носили иной характер. В зоне резкого изменения температуры она не испытывала больших колебаний и средние значения ее оставались на уровне 190 мксим./см. Но, как и по температуре, в этом районе наблюдались заметные различия в минерализации вод

нытесня воды половодья из верхнего речного участка водохранилища, они и формируют в последнем рассмотренную нами выше водную массу, которая, имея значительно более высокую температуру, даже при более высокой электропроводности, натекает на воды приплотинного участка. В зоне соприкосновения этих вод наблюдаются большие градиенты характеристик.

Натекание прогретых вод речного участка водохранилища на более холодные придонные воды приплотинной части происходит настолько интенсивно, что к середине июня они в поверхностных горизонтах обычно достигают плотности. Положение изотерм (рис. 2) показывает, что в русловой части водохранилища на участке от Канакова до плотины зона смешения их с придонной водной массой проходит в горизонтальной плоскости. По мере сработки водохранилища зона смешения этих водных масс меняет свое положение. В результате сработки холодных вод через ГЭС и трансформации объем их систематически уменьшается и зона больших градиентов характеристик постепенно перемещается к плотине.

Представленная картина распределения и особенностей водных масс Ивановского водохранилища для весеннего сезона вполне объективна. Подтверждением ее служит распределение температуры воды в русловой части водоема в июне 1956 г. Из табл. 1 видно, что в 1956 г. так же, как и в 1961 г., на участке от Канакова до плотины глубоководная приплотинная часть водохранилища была заполнена более холодными водами несенного происхождения.

Т а б л и ц а 1

Температура воды в русловой части Ивановского водохранилища в июне 1956 г. (по В. И. Рутковскому)

Число	Часы	Станции	Глубина, м	Температура, °C		Разность температур
				поверхностная	придонная	
8	17	Нижний бьеф Ивановской ГЭС . .	6.0	17.5	17.2	0.3
9	6	Приплотинный участок	7.5	20.0	15.5	4.5
9	12	У начала Перетрусовского хода	13.0	19.5	13.2	6.3
9	16	Пристань «Устье Сози»	17.0	22.0	13.3	8.7
10	—	Канаково	10.2	21.5	14.5	7.0
10	14	Терехово	12.0	25.1	16.9	8.2
12	9	Лисицы	11.0	20.5	18.9	2.6
12	14	Перемерок	6.5	22.3	22.3	0

Таким образом, по продольной оси Ивановского водохранилища весной отчетливо выделяются две водные массы: теплые воды речного участка и холодные воды весеннего половодья глубоководной приплотинной части водоема. Пространственное распределение их в водохранилище можно представить по расположению изотерм на рис. 2, а их формирование связано с трансформацией волжской воды в водоеме. В результате этой трансформации температура волжской воды по пути перемещения ее несколько понижается, а вод весеннего половодья повышается. Электропроводность в обоих случаях заметно увеличивается.

До последнего времени трудно было решить, сохраняется ли различие вод водохранилища в летне-осенний период. С одной стороны, при мелко-водности водоема, интенсивном водообмене и однородности вод, поступающих в него, такие различия казались маловероятными. Но, с другой стороны, даже при максимальном водообмене весной, они наблюдаются. В первом приближении ответить на этот вопрос позволяют материалы скоростной съемки, выполненной 8—10 VIII 1966. Они показали, что и летом температура, и особенно электропроводность, в Ивановском водохранилище по ходу вод заметно меняются, причем тенденция изменения их остается такой же, как и весной.

В августе 1966 г. в водохранилище поступала волжская вода со средней температурой на русле 20.4° и электропроводностью около 250 мксим./см. При движении ее в речном участке водохранилища температура сначала непрерывно повышалась и в районе Поддубья достигала 22° . При дальнейшем перемещении вод к плотине наблюдалась обратная картина: температура медленно, но систематически понижалась и в верхнем бьефе Ивановской ГЭС составляла 21.2° . Общее понижение средней температуры по продольному русловому профилю на 100 км составляло лишь 0.8° . Подобным образом изменялась и электропроводность: сначала наблюдалось заметное увеличение ее, а после максимума в районе Поддубья первоначально резкое до Единонова, а ниже его более медленное понижение до самой плотины. Как и весной, наиболее резкое увеличение электропроводности наблюдается ниже Калинина. Изменение температуры и электропроводности в водохранилище летом происходит одновременно во всей толще воды, и поэтому различия этих характеристик по вертикали невелики.

Анализ температуры и электропроводности для летнего периода показал, что, несмотря на некоторые изменения этих характеристик по длине водохранилища, в этом сезоне оно заполнено весьма однородной водной массой. Последняя представляет собой частично трансформированные волжские воды. Трансформация волжской воды летом в Ивановском водохранилище выражается в заметном повышении температуры и понижении электропроводности.

Распределение температуры и электропроводности, и в частности положение зоны смещения различных водных масс весной, указывает на то, что решающим фактором трансформации вод в Ивановском водохранилище является скоростной режим. Ивановское водохранилище характеризуется быстрой сменой водных масс: средний объем его обновляется за 26 дней, тогда как средний объем Рыбинского водохранилища — за 7 месяцев (Зиминова, 1959). Наиболее интенсивный водообмен в водохранилище наблюдается весной, в период летне-осенней межени он резко уменьшается и вновь увеличивается во второй половине зимы. Естественно, что с характером водообмена связано перемещение водных масс в водоеме. Как интенсивность водообмена, так и скорость перемещения вод зависит прежде всего от величины и продолжительности сбросов воды через гидросооружения. Поскольку величины сбросов могут варьировать в диапазоне $0—7500 \text{ м}^3/\text{сек.}$, то и скорости перемещения вод изменяются в широких пределах. По расчетам В. П. Курдина (1961), средние скорости, вычисленные как отношение среднемесячного секундного забора воды из водохранилища к среднемесячной площади водного сечения выбранного створа, колеблются между $0.03—0.12 \text{ м/сек.}$ Подобные скорости течения от плотины до Шошинского плеса были получены и в результате инструментальных наблюдений. Заметное увеличение скорости течения происходит лишь в зоне выклинивания подпоры (Буторин, 1959).

Некоторое представление об особенностях скоростного режима при плотинном участке водохранилища в летний период можно получить из

рис. 3. Регистрация скорости и направления течения в верхнем бьефе ГЭС и на правом склоне русла Волги у Городища в июле 1963 г. самопис-

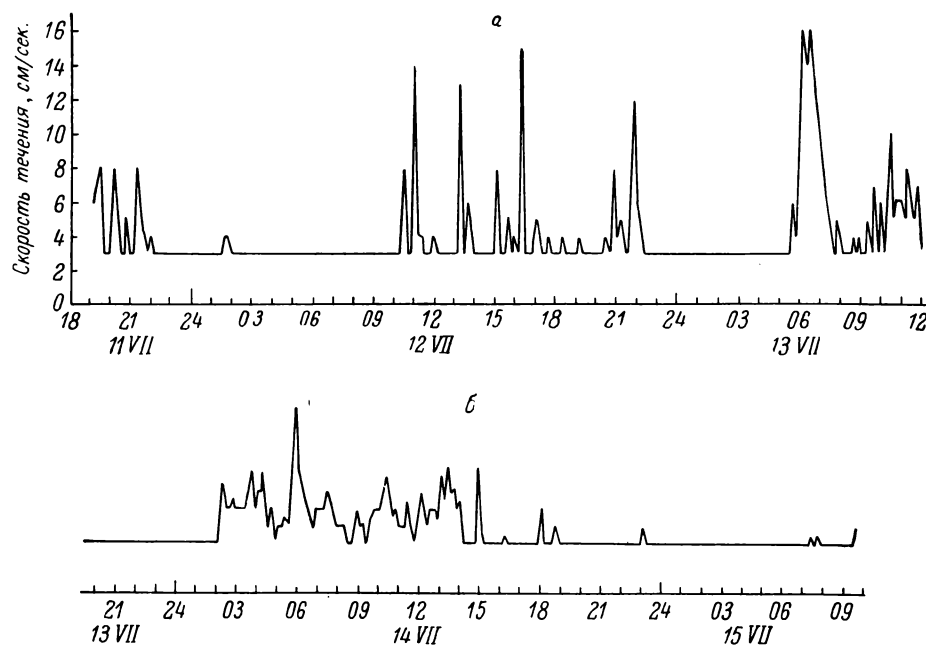


Рис. 3. Скорости течения в верхнем бьефе Ивановской ГЭС (а) и у Городища (б) 11—15 VII 1963.

цами БПВ-2-р показала, что скорости течения в этих районах резко меняются. Так, в верхнем бьефе ГЭС скорость течения на горизонте 2.5 м в отдельные сроки измерений достигала 0.14—0.16 м/сек., тогда как продолжительные промежутки времени она была на пределе чувствительности прибора и не превышала 0.03 м/сек. (рис. 3, а). Если величина скорости течения вблизи ГЭС во времени может резко меняться, то направление потока довольно устойчиво — в сторону ГЭС.

С удалением от плотины скорость течения заметно уменьшается и у Городища она, как правило, не превышала 0.07 м/сек. (рис. 3, б). С уменьшением скорости течения уменьшается и устойчивость потока по направлению: у Городища вполне определенного перемещения вод не наблюдалось.

Из табл. 2 видно, что вблизи плотины преобладает юго-восточный перенос водных масс, соответствующий общему направлению перемещения вод в сторону ГЭС, тогда как у Городища восточное направление пере-

носа не является четко преобладающим. Наиболее вероятно, что такие изменения, особенно скоростей течения, связаны с режимом работы ГЭС,

Таблица 2

Направление переноса водных масс в верхнем бьефе Ивановской ГЭС и у Городища 11—15 VII 1963

Направление течения	Число определений	
	верхний бьеф ГЭС, 11—13 VII	Городище, 13—15 VII
С	1	—
ССВ	3	1
СВ	—	1
ВСВ	8	—
В	—	9
ВЮВ	16	5
ЮВ	4	—
ЮЮВ	7	2
ЮЮЗ	—	2
ЗЮЗ	—	8
З	—	2
ЗСЗ	3	4
СЗ	—	1
ССЗ	—	3

Изменения электропроводности по ходу водной массы в Угличском водохранилище невелики. Обычно ее значения колеблются около 170—180 мксим./см. Только в районе р. Дубны она увеличивалась от 170 до 220 мксим./см (рис. 4). Некоторое повышение ее наблюдается и у Кимр. С повышением электропроводности в указанных районах связано и увеличение ее по всей длине водохранилища. Несмотря на это, общая тенденция изменения электропроводности по ходу воды сохраняется такой же, как и в Ивановском: по направлению к плотине она постепенно уменьшается и в непосредственной близости от нее значения электропроводности становятся такими же, как и в приплотинном участке Ивановской ГЭС.

Подобная картина распределения электропроводности в водохранилище наблюдалась и в последней декаде июня 1963 г. Несмотря на то что абсолютные значения ее до Калязина были значительно выше, чем в июне 1961 г., общий характер изменения электропроводности по ходу воды сохранился: по направлению к плотине Угличской ГЭС она уменьшалась. Особенно резкое уменьшение электропроводности наблюдалось между Калязиным и Прилуками, где она уменьшилась на 160 мксим./см. Достигнув в районе Прилук значений, близких к 180 мксим./см, электропроводность в приплотинном участке водоема не испытывала значительных изменений и была такой же, как в июне 1961 г.

Таким образом, в зависимости от местных условий и погодных особенностей сезона значения температуры и электропроводности воды в Угличском водохранилище могут меняться, но, несмотря на это, на основе этих характеристик затруднительно выделить в нем различные водные массы. Хотя в русловой части приплотинного участка водохранилища, как и в Ивановском, весной наблюдается температурное расслоение водной толщи, но последняя представляет собой единую водную массу. Сопоставляя температуру и электропроводность вод приплотинных участков этих водохранилищ, легко заметить, что по значениям этих характеристик они близки между собой. Следовательно, в Угличском водохранилище, по крайней мере весной, существенной трансформации волжских вод не происходит. Последняя осуществляется лишь на отдельных участках водоема и выражается главным образом в повышении электропроводности вод, поступающих из Ивановского водохранилища.

Особенности весенней трансформации волжских вод в Угличском водохранилище сохраняются и летом. Так, в августе 1966 г. из Ивановского в Угличское водохранилище поступала водная масса, средняя температура которой была порядка 20.6° , а электропроводность 210 мксим./см. После незначительного повышения температуры, которое наблюдалось до Кимр, последняя практически не менялась по всей длине водохранилища. Изменения электропроводности были более существенны, но характер их оставался такой же, как весной: после значительного увеличения ее в нижнем бьефе Ивановской ГЭС она систематически уменьшалась и наименьшие значения имела у плотины Угличской ГЭС. Сопоставляя температуру и электропроводность воды в верхнем бьефе Ивановской и Угличской ГЭС, мы видим, что при прохождении ее через Угличское водохранилище температура практически не изменилась, а электропроводность уменьшилась лишь на 10 мксим./см. Таким образом, и летом значительной трансформации вод при прохождении их через Угличское водохранилище не наблюдается. Наиболее вероятно, что незначительная трансформация волжской воды в этом водоеме объясняется его высокой проточностью.

По характеру водообмена Угличское водохранилище сходно с Ивановским. Объем водной массы водохранилища, по расчетам Т. Н. Кур-

диной (1959), обновляется в среднем раз в месяц. Но есть основания предполагать, что во многих случаях он происходит более интенсивно. Это видно из рассмотрения скоростей течения. Так, в мае 1957 г. в верхнем бьефе Угличской ГЭС скорость течения на поверхности равнялась 0.20 м/сек., а на глубине 9 м достигала 0.25 м/сек. (Буторин, 1959).

Результаты наблюдений с помощью самописцев БПВ-2-р в июне 1963 г. показали, что по всей длине водохранилища скорости течения не только на русловых, но и на пойменных вертикалях достигают значительной величины и колеблются в широких пределах. Так, в верхнем бьефе Угличской ГЭС, примерно в 2 км от плотины, скорость течения на глубине 2 м в отдельные сроки наблюдений равнялась 0.18 м/сек., а на глубине 7.3 м достигала 0.27 м/сек. (рис. 5, а). Несколько уменьшается скорость у Прилук (рис. 5, б), причем в поверхностном горизонте на этой вертикали в отличие от предыдущей она выше, чем на глубине. С удалением от плотины скорости вновь увеличиваются, и у Калязина они примерно в 2 раза выше, чем у Прилук. Весьма интересно (рис. 5, в) неравнозначное изменение скоростей на правой и левой пойме у Калязина; при синхронных измерениях в большинстве случаев увеличение скорости на правом склоне русла сопровождается уменьшением ее на левой пойме и наоборот. Вероятно, на перемещение водных масс в этом районе существенное влияние оказывают местные морфометрические особенности, которые значительно осложняют циркуляцию вод. В районе Кимр (рис. 5, г) скорость течения несколько понизилась против наблюдавшейся у Калязина и к концу наблюдений продолжала уменьшаться, что, вероятно, связано с режимом работы Ивановской ГЭС.

Регистрация элементов течения с 10-минутными интервалами в течение суток и более позволяет вычислить средние скорости (табл. 3). Величина их и изменение по длине водохранилища полностью подтверждают наши данные (Буторин, 1959) об интенсивности переноса вод в этом водоеме, по крайней мере для летнего периода.

Обращает внимание резкое изменение скорости на всех горизонтах взятых вертикалей. В ряде случаев изменения ее между соседними часовыми отметками достигали 0.15 и даже 0.22 м/сек., причем наиболее резкие изменения отмечаются на участке водохранилища, примыкающем к плотине. Это дает основание предполагать, что такие резкие изменения величины скорости в какой-то мере зависят от режима работы ГЭС.

Если сопоставить ежечасные расходы Угличской ГЭС и величины скорости течения за те же часы на станции, расположенной примерно в 2 км от нее, легко заметить, что и при относительно стабильных расходах ГЭС макропульсации скорости сохраняются. Это хорошо видно из данных табл. 4: при очень небольших колебаниях ежечасных расходов Угличской ГЭС 21—22 VI скорость течения на горизонте 2, как и на горизонте 7.3 м, испытывала значительные колебания, причем часто неоднозначные с изменениями расхода. Следовательно, даже в непосредственной близости от плотины Угличской ГЭС перемещение водных масс не является только результатом работы последней. Наиболее вероятно, что макропульсации скорости в Угличском водохранилище вызываются совместными воздействиями работы Угличской и Ивановской ГЭС. Направление перемещения вод в Угличском водохранилище в общем идет по руслу Волги, преимущественно на север-северо-восток.

Так как характер перемещения вод в Угличском водохранилище такой же, как и в Ивановском, то и причины изменения характеристик вод в них общие. Но, поскольку Угличское водохранилище заполнено однородной водной массой, в процессе турбулентного перемешивания в нем происходит лишь некоторое выравнивание ее характеристик и трансформация вод невелика.

Таким образом, несмотря на значительную проточность Иваньковского, и особенно Угличского водохранилища, и непродолжительное пребывание

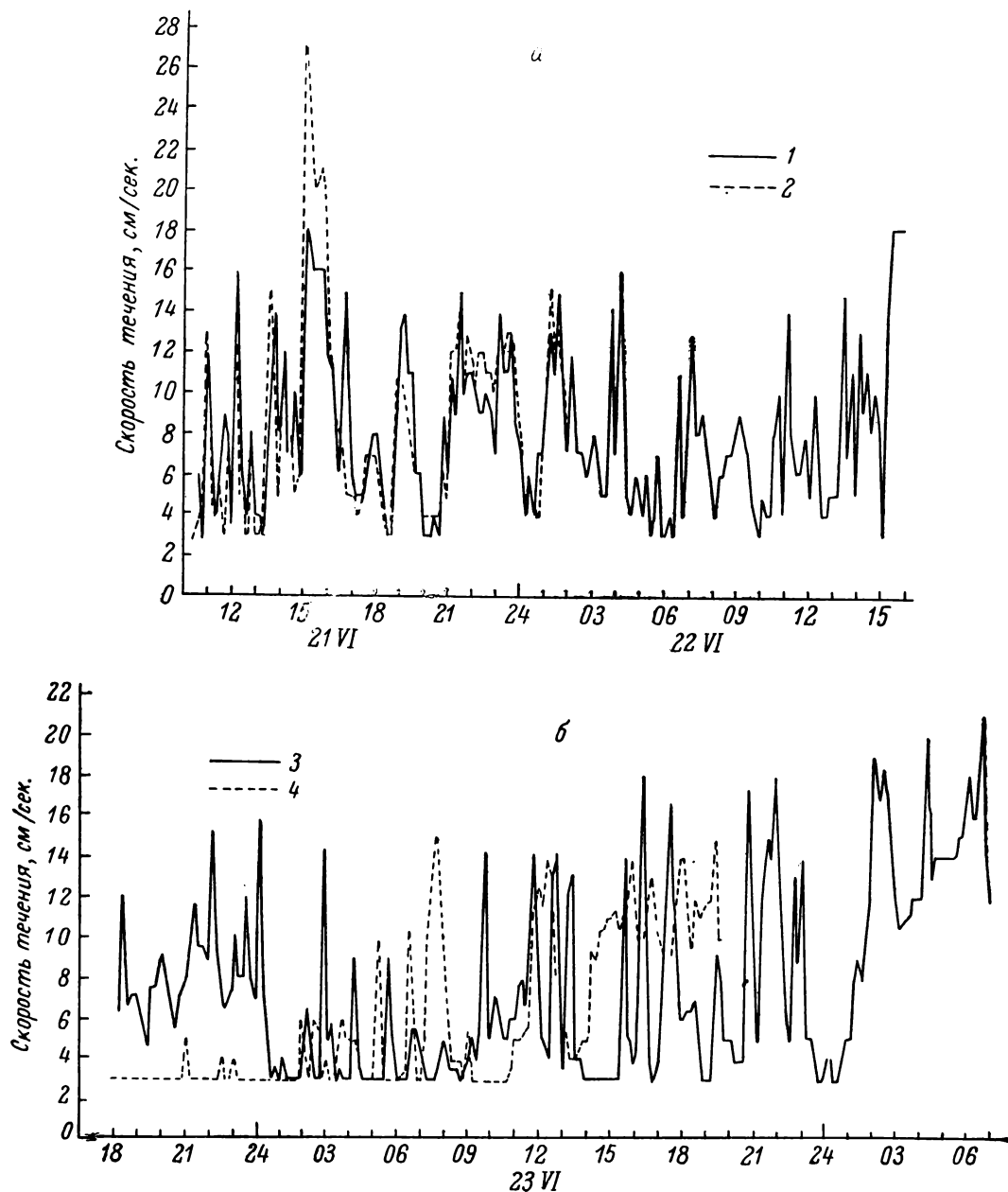


Рис. 5. Скорости течения в верхнем бьефе Угличской ГЭС (а), у Прилук (б), у Калязина (в) и у Кимр (г) 21—27 VI 1963.

1 — на горизонте 2 м; 2 — на горизонте 7.3 м; 3 — на горизонте 1.4 м; 4 — на горизонте 5.5 м; 5 — на горизонте 2.5 м (левая пойма); 6 — на горизонте 3.0 м (правый склон русла); 7 — на горизонте 1.5 м; 8 — на горизонте 4.0 м.

волжской воды в пределах этих водоемов, в них происходит заметное изменение не только химических свойств ее, но и ряда физических характеристик. Это касается прежде всего температуры и электропроводности. Поступая в водоем замедленного водообмена, волжская вода

весной теряет часть тепла, а общая минерализация ее повышается. Летом наблюдается обратная картина: теплозапас волжских вод увеличивается, а минерализация уменьшается за счет разбавления их водами

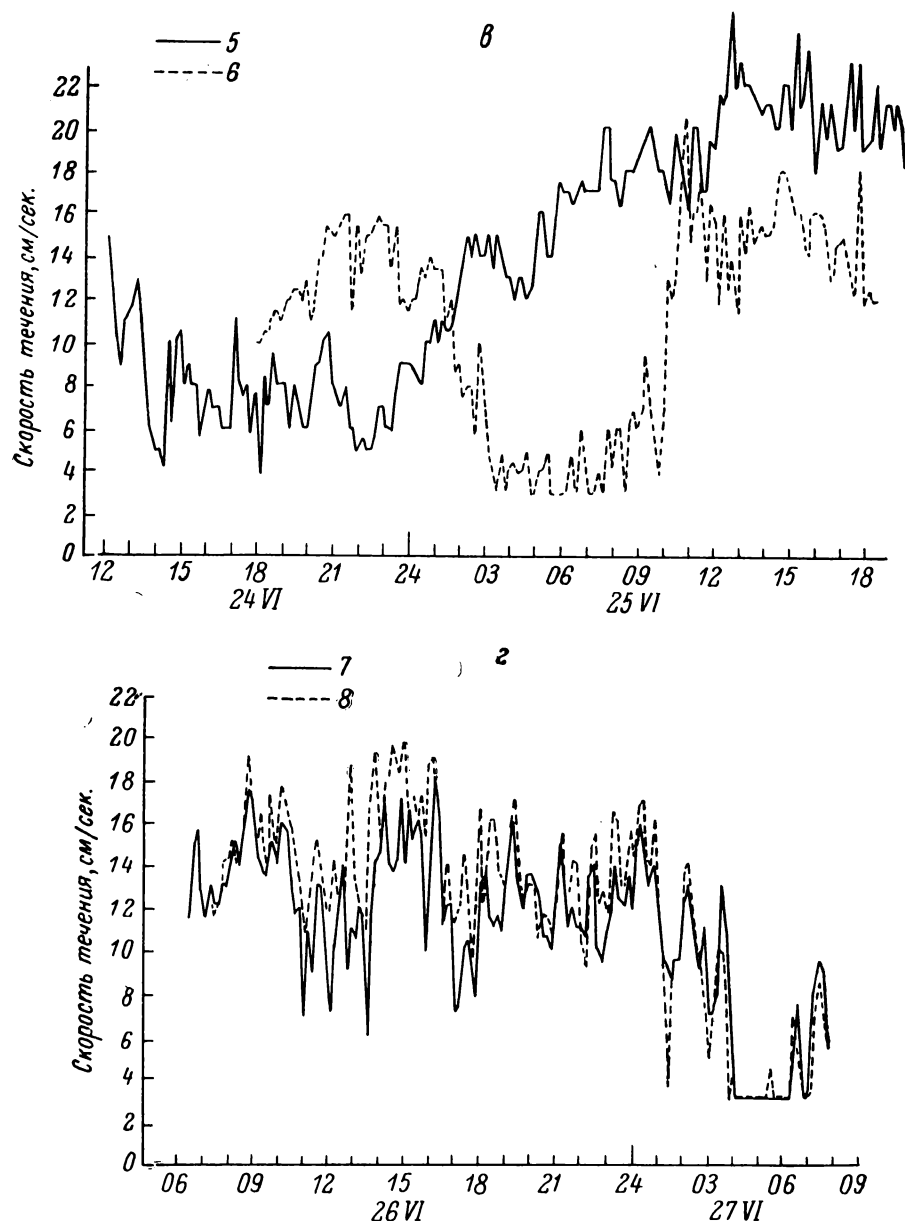


Рис. 5 (продолжение).

водохранилища. Весной в Иваньковском водохранилище изменение рассматриваемых характеристик волжской воды настолько значительно, что позволяет говорить о формировании в водоеме различных водных масс.

Одним из основных факторов трансформации волжской воды в Иваньковском и Угличском водохранилищах является скоростной режим. При

Т а б л и ц а 4

Изменение расходов Угличской ГЭС и скорости течения
в верхнем бьефе 21—22 VI 1963

Дата, часы	Расход ГЭС, м ³ /сек.	Скорость течения, мк/сек.		Измене- ние расхода, м ³ /сек.	Изменение скорости течения, мк/сек.	
		2 м	7.3 м		2 м	7.3 м
21 VI 11.00	1057	0.12	0.13			
12.00	1053	0.04	0.04	— 4	—0.08	—0.09
13.00	1162	0.04	0.03	+109	0	—0.01
14.00	1144	0.08	0.05	— 18	+0.04	+0.02
15.00	1166	0.18	0.27	+ 22	+0.10	+0.22
16.00	1188	0.12	0.15	+ 22	—0.06	—0.12
17.00	1172	0.06	0.05	— 16	—0.06	—0.10
18.00	1160	0.08	0.07	+ 12	+0.02	+0.02
19.00	1166	0.13	0.11	+ 6	+0.05	+0.04
20.00	1174	0.03	0.04	+ 8	—0.10	—0.07
21.00	1168	0.06	0.05	— 6	+0.03	+0.01
22.00	1168	0.11	0.12	0	+0.05	+0.07
23.00	1166	0.07	0.10	— 2	—0.04	—0.02
24.00	1188	0.08	0.09	+ 22	+0.01	—0.01
22 VI 01.00	1091	0.07	0.07	— 97	—0.01	—0.02
02.00	1086	0.07	0.08	— 5	0	+0.01
03.00	1079	0.07	0.035	— 7	0	— 0.045
04.00	1082	0.07	0.03	+ 3	0	—0.005
05.00	1079	0.05	0.045	— 3	—0.02	+0.015
06.00	1082	0.03	0.035	+ 3	—0.02	—0.01
07.00	1075	0.06	0.05	— 7	+0.03	+0.015
08.00	1073	0.06	0.075	— 2	0	—0.005
09.00	1102	0.08	0.09	+ 29	+0.02	+0.045
10.00	1105	0.03	0.035	+ 3	—0.05	—0.055
11.00	1100	0.04	0.035	— 5	+0.01	0

значительных скоростях течения перемещение вод в них сопровождается интенсивным турбулентным перемешиванием, в процессе которого и происходит изменение характеристик. Так как при относительно высоких коэффициентах водообмена время нахождения волжской воды в пределах рассматриваемых водохранилищ под воздействием одних и тех же метеорологических условий невелико, то роль последних в ее трансформации значительно меньше.

Подобное явление наблюдалось Н. А. Зиминовой (1963) при прохождении онежской воды через свирские водохранилища. Оказалось, что последняя при этом также значительно трансформируется, причем трансформация ее обусловлена как физико-географическими условиями бассейна, так и особенностями гидрологического режима водохранилищ.

Таким образом, при прохождении Ивановского и Угличского водохранилищ волжские воды заметно изменяют свои характеристики, причем изменение последних в отдельные сезоны имеет свои особенности. Вполне вероятно, что это обстоятельство оказывает определенное влияние на биологические процессы, протекающие в этих водоемах, и несомненно должно учитываться при использовании водных ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

- Б у т о р и н Н. В. 1959. К вопросу о проточности Ивановского и Угличского водохранилищ. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 3.
Б у т о р и н Н. В. 1964. К методике сбора полевых материалов для изучения режима и балансовых характеристик крупных водохранилищ. Сб. работ Комсомольской гидрометеорол. обсерватории, вып. 4.

- Б у т о р и н Н. В. 1965а. О водных массах континентальных водоемов. В сб.: Динамика водн. масс водохр. в связи с распредел. организмов, изд. «Наука», М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В. 1965б. К изучению водных масс Рыбинского водохранилища. В сб.: Динамика водн. масс водохр. в связи с распредел. организмов, изд. «Наука», М.—Л.
- З и м и н о в а Н. А. 1959. Элементы гидрологического режима и водный баланс Ивановского водохранилища за 1951—1956 гг. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2.
- З и м и н о в а Н. А. 1963. Изменения свойств онежской воды при прохождении через Свижские водохранилища. В сб.: Материалы по биол. и гидрол. волжских водохр., изд. АН СССР, М.—Л.
- К у р д и н В. П. 1961. Грунты Ивановского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 4.
- К у р д и н Т. Н. 1959. Элементы гидрологического режима и водный баланс Угличского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2.
- Л и т в и н о в А. С. 1966. Некоторые данные о ветровых течениях в Рыбинском водохранилище. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерватории, № 3.
- Р у т к о в с к и й В. И. 1963. Распределение температуры вдоль верхневолжских водохранилищ в период интенсивного прогревания. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 13.
- Р у т к о в с к и й В. И. 1963. Температурный режим Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 5.
- Р у т к о в с к и й В. И. 1964. Опыт применения скоростной съемки температуры и электропроводности для изучения температурного режима и перемещений водных масс в водохранилищах. В сб.: Методы изучения и использ. водн. ресурсов, изд. «Наука», М.
- Р ы б о п р о м ы с л о в ы й а т л а с Рыбинского водохранилища. 1963. Ярославль.
- Щ е р б а к о в А. П. 1950. Гидрохимический режим Волги, Мологи и Шексны в районе Рыбинского водохранилища (до наполнения водохранилища). Тр. биол. ст. «Борок» АН СССР, вып. 1.
- Э д е л ь ш т е й н К. К. 1965. Водные массы озерной части Горьковского водохранилища. В сб.: Динамика водн. масс водохр. в связи с распредел. организмов, изд. «Наука», М.—Л.
-

Н. В. Буторин и Н. П. Смирнов

ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДНЫХ МАСС КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ВОДОЕМОВ СТАТИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВМ

Работами русских и зарубежных авторов убедительно показано, что понятие «водная масса» в смысловом определении А. Д. Добровольского (1961) применимо не только к морям и океанам, но и к большим континентальным водоемам. Распределение некоторых физических и химических характеристик вод позволяет выделить в них водные массы, обладающие определенными физическими и химическими свойствами (Буторин, 1965).

Особенно четко гетерогенность водных масс прослеживается в водохранилищах. Так, в Рыбинском водохранилище отчетливо выделяются водные массы Волги, Мологи, Шексны и центральной части водоема. В общих чертах распределение водных масс в Рыбинском водохранилище по сезонам года сводится к следующему. Весной значительные районы водохранилища, прилегающие к речным участкам Волги, Мологи и Шексны, заполнены Волжской, Моложской и Шекснинской водными массами. В летне-осенний период районы, занимаемые этими массами, постепенно уменьшаются, и осенью они прослеживаются лишь в местах выхода в озеровидную часть водохранилища. Обширную акваторию в центральной части водохранилища в эти сезоны занимает водная масса аналогичного названия. Зимой Волжская, Моложская и Шекснинская массы постепенно вытесняют водную массу центральной части водохранилища и к концу зимы снова занимают по затопленным долинам соответствующих рек обширные пространства водоема (Буторин, 1966а).

В отдельные сезоны существенные различия между водными массами в Рыбинском водохранилище хорошо прослеживаются даже на ограниченных участках водоема. Подобные явления наблюдаются и на других водохранилищах волжского каскада (Эдельштейн, 1965).

Основной задачей при анализе водных масс любого водоема является правильное выделение отдельных разновидностей вод, их качественная и количественная характеристика. Решение ее может быть обеспечено лишь при условии правильного, физически обоснованного подбора критериев или показателей, которые должны лечь в основу выделения водных масс. Решающую роль при этом играет и выбор принципа выделения водных масс.

Для выделения водных масс в пресных водоемах, как и в морских, обычно используются физические и химические характеристики вод. В отдельные сезоны для некоторых водоемов удается установить распределение водных масс даже по одному-двум показателям, например по концентрации карбонатов и температуре (Schmalz, 1932), мутности (Atkins a. Jenkins, 1955; Зиминова, 1963), концентрации сульфатов (Schrä-

deg, 1956), цветности и прозрачности (Фортунов, 1953), электропроводности (Казаровец, 1960). Однако такая возможность выделения водных масс представляется весьма редко. В настоящее время нам неизвестно единого показателя или группы вполне определенных показателей, которые были бы общими для пресных водоемов и позволяли бы непосредственно характеризовать их водные массы.

До последнего времени при выделении водных масс в волжских водохранилищах нами использовались методы, заимствованные из океанологии. Эти методы базируются на анализе горизонтального и вертикального распределения отдельных характеристик среды. Так, в основе одного из таких методов лежит анализ пространственного распределения величин наиболее репрезентативного показателя. При этом методе граница между водными массами приходится на линию максимальных градиентов данного показателя. Другой метод позволяет использовать одновременно два показателя. Он основан на построении и анализе кривых типа TS и треугольников смещения. Разграничение водных масс при этом методе производится по линиям 50%-го их смещения (Буторин, 1966б).

Несмотря на некоторые положительные результаты применения указанных методов для выделения водных масс в волжских водохранилищах, в использовании их существуют определенные затруднения. Так, при использовании метода максимальных градиентов весьма вероятны случаи, когда линии раздела по нескольким вполне репрезентативным показателям пространственно не совпадают. В таких случаях трудно отдать предпочтение тому или иному показателю и выбор одного из них для разграничения водных масс оказывается в известной мере субъективным. При неустойчивом режиме и мелководности водохранилищ встречаются затруднения и при выделении водных масс по кривым типа TS , прежде всего из-за большого разброса точек, обусловленного как сезонной изменчивостью показателей, так и неодинаковой репрезентативностью последних. Все это приводит к известной неопределенности в проведении границ между водными массами. Кроме того, данные методы не позволяют оценить степень надежности результата выделения водных масс.

Из самого определения понятия водная масса следует, что наиболее целесообразно выделять водные массы в любом водоеме по целому комплексу различных показателей состояния среды. Однако учет нескольких показателей одновременно для этих целей обычно весьма затруднителен, поскольку все они имеют различные единицы измерения и степень изменчивости. Поэтому прежде всего необходимо выразить значения показателей в одной системе единиц. Для этого можно использовать метод стандартизации признаков (Sokal a. Sueath, 1963). Сущность этого метода состоит в том, что значения того или иного признака рассматриваются в виде статистического ряда независимых переменных и преобразуются по формуле

$$S_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma},$$

где x_i — численное значение показателя; \bar{x} — среднее ряда, σ — стандартное отклонение и S_i — стандартизованное значение показателя.

Одна из первых попыток применения метода стандартизации признаков для выделения водных масс в мелководном пресном водоеме принадлежит М. Г. Ершовой (1968). Учитывая, что точность измерений различных показателей значительно варьирует, Ершовой при вычислении S_i был введен поправочный коэффициент, зависящий от точности измерения и степени изменчивости ряда соответствующего показателя, на который

умножаются значения S_i . Формула для вычисления этого коэффициента имеет вид

$$K_p = 1 - \frac{T}{C_p},$$

где T — удвоенная ошибка определения показателя, выраженная в долях от среднего (\bar{x}),¹ а C_p — коэффициент вариации ряда. Из этой формулы видно, что если коэффициент вариации связан в основном с точностью определения показателя ($T \rightarrow C_p$), то значимость этого показателя очень мала ($K_p \rightarrow 0$) и его удельный вес при сравнении характеристик незначителен.

Общее выражение для вычисления стандартизованного значения запишется, таким образом, в виде

$$S_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \left(1 - \frac{T}{C_p} \right).$$

Степень же различия d любых двух точек n и m по комплексу признаков будет характеризоваться выражением

$$d = \sqrt{(S_n - S_m)_1^2 + (S_n - S_m)_2^2 + \dots + (S_n - S_m)_l^2},$$

где l — число используемых показателей.

Таким образом, применение этого метода позволяет оценить различия между водными массами в двух точках по любому комплексу показателей, характеризующих не только физические, химические, но и биологические особенности вод.

Развивая этот метод на примере Рыбинского водохранилища, мы попытались получить коэффициенты различия d между каждой станцией на водоеме со всеми другими по шести показателям: температуре, электропроводности, жесткости, цветности, концентрации гидрокарбонатов и кальция для поверхностного и придонного горизонтов по всем синхронным съемкам за 1960—1964 гг. Решение этой задачи при большом числе станций и многократной повторности их требует огромной вычислительной работы. Достаточно сказать, что при числе станций на водоеме, равном 50, необходимо вычислить 1225 значений d . Такой объем работ может быть выполнен при условии использования электронно-счетной вычислительной машины. Учитывая это, на основе изложенного метода была составлена программа для электронно-счетной вычислительной машины БЭСМ-2 м, на которой и выполнены соответствующие расчеты.²

В машину засылалась информация о длине ряда (количество станций), числе используемых показателей, удвоенные точности их определения и ряды значений самих показателей. Машина выдавала на печать значения коэффициентов d — различия между водной массой на каждой станции со всеми последующими по всему комплексу показателей, среднее значение каждой характеристики по всему водоему, стандартное отклонение, коэффициент вариации и стандартизованные значения характеристик.

На первом этапе был выполнен анализ 12 съемок, проведенных в 1960—1961 гг. В табл. 1 представлены число станций в съемке и принятые точности определения элементов, а также средние значения ис-

¹ Как показали результаты наших исследований, коэффициент K_p оказался слишком жестким вследствие малообоснованного удвоения ошибки определения показателя T . Поэтому в дальнейшем при использовании данной методики следует принимать за T просто ошибку измерения или определения показателя.

² Программа составлена П. С. Гасюковым, которому авторы выражают свою благодарность.

пользуемых показателей по всему водоему и величины σ и C_V , полученные из анализа четырех съемок, выполненных в различные сезоны 1960/61 гидрологического года.

Данные этой таблицы хорошо отражают сезонную изменчивость показателей вод Рыбинского водохранилища и их статистических характеристик. Как видно уже из таблицы, наибольшая неоднородность вод водохранилища наблюдается в весенний период, наибольшая однородность их характерна для осенне-летнего периода. Результаты анализа по остальным съемкам хорошо соответствуют приведенным данным.

Прежде чем перейти к выделению водных масс в Рыбинском водохранилище с помощью коэффициентов различия d , полученных из анализа, необходимо решить вопрос о выборе критерия значимости для d , т. е. определить величину «различия» признаков, достаточную для отнесения водных масс в двух точках к разным совокупностям.

Рассмотрим этот вопрос более подробно. Предположим, что мы имеем совокупность точек, характеризующих только одним признаком. Примем значимой такую разность значений этого признака, при которой она удовлетворяет вероятности случайного отклонения от среднего всей совокупности, равной 0.01, т. е. обычно применяемой в математической статистике вероятности, достаточной для отнесения точки к другой совокупности. Этому значению вероятности удовлетворяет разность значений признаков, равная 2.6σ .

$$\Delta x_{ан} = x_n - x_m = 2.6\sigma.$$

Преобразуем это выражение следующим образом:

$$\frac{x_n - \bar{x}}{\sigma} - \frac{x_m - \bar{x}}{\sigma} = \frac{2.6\sigma}{\sigma}.$$

Таблица 1
Средние значения, стандартные отклонения и коэффициенты вариации по данным съемок, выполненных в различные сезоны 1960—1961 гг.

Показатели	9 V 1960			28 VII 1960			4 X 1960			14 II 1961			Принятая точность определения показателя
	среднее	σ	C_V	среднее	σ	C_V	среднее	σ	C_V	среднее	σ	C_V	
Температура, ° C	5.61	2.44	0.43	23.71	0.44	0.02	9.03	0.53	0.06	0.15	0.17	1.09	0.01
Электропроводность, мксм./см	157	57	0.36	161	19	0.12	170	30	0.18	194	29	0.15	0.03
Концентрация гидро- карбонатов, мг-экв./л	1.39	0.52	0.38	1.40	0.21	0.15	1.44	0.35	0.24	1.64	0.28	0.17	0.01
Жесткость, мг-экв./л	1.65	0.56	0.34	2.15	0.26	0.12	2.16	0.31	0.14	2.38	0.38	0.16	0.01
Концентрация кальция, мг-экв./л	1.22	0.41	0.33	1.34	0.13	0.10	1.51	0.25	0.16	1.72	0.25	0.15	0.01
Цветность, град. . . .	38	14	0.37	26	7	0.28	30	4	0.14	38	15	0.39	0.12
Число станций . . .	45			60			54			39			

В случае $K_p=1$,

$$\frac{x_n - \bar{x}}{\sigma} = S_n, \quad \text{а} \quad \frac{x_m - \bar{x}}{\sigma} = S_m.$$

Тогда

$$(S_n - S_m)_{\text{ан}} = 2.6 \quad \text{и} \\ d_{\text{ан}} = \sqrt{(S_n - S_m)^2} = (S_n - S_m) = 2.6.$$

Теперь возьмем совокупность точек, характеризующих двумя независимыми признаками. Вероятность случайного отклонения на одну и ту же величину для обоих признаков будет равна произведению вероятностей случайного отклонения каждого из них на эту величину

$$P_{1,2} = P_1 \cdot P_2.$$

Если принять $P_{1,2}$, как и в первом случае, равной 0.01, то значимые разности значений для признаков будут равны 1.7σ . Если

$$\Delta x_{\text{ан}} = 1.7\sigma, \quad \text{то} \quad (S_n - S_m)_{\text{ан}} = 1.7 \quad \text{и} \\ d_{\text{ан}} = \sqrt{(S_n - S_m)_1^2 + (S_n - S_m)_2^2} = \sqrt{(1.7)^2 + (1.7)^2} = 2.4.$$

Рассуждая таким же образом для случая совокупности, характеризующей тремя независимыми признаками, получили

$$\Delta x_{\text{ан}} = 1.3\sigma, \quad \text{а} \quad d_{\text{ан}} = 2.2$$

и четырьмя

$$\Delta x_{\text{ан}} = \sigma, \quad \text{а} \quad d_{\text{ан}} = 2.0.$$

В практике гидрологических исследований континентальных водоемов редко приходится иметь дело с более чем тремя-четырьмя независимыми признаками, характеризующими состояние водных масс, поэтому с определенной погрешностью в выборе критерия вероятности d можно принимать от 2.0 до 2.4.

Однако при анализе водных масс волжских водохранилищ нами используется комплекс признаков, среди которых имеются зависимые друг от друга, и при этом $K_p \neq 1$.

В этом случае формула для вычисления $d_{\text{ан}}$ в общем виде запишется следующим образом:

$$d_{\text{ан}} = \mu \sqrt{\sum_{i=1}^t (K_p)_i^2},$$

где μ представляет собой величину превышения σ и должно выбираться в зависимости от числа независимых показателей t , используемых в анализе ($t=2$, $\mu=1.7$; $t=3$, $\mu=1.3$; $t=4$, $\mu=1.0$), и при условии, что $K_p \geq 0.50$.

Для того чтобы как-то учесть роль зависимых признаков при нахождении μ , определение числа t можно проводить по следующей формуле:

$$t = t_0 + \sum_{i=1}^{t-t_0} (1-r)_i,$$

где t_0 — число действительно независимых признаков, а r — коэффициент корреляции между зависимыми признаками.

Однако с определенной погрешностью в сторону занижения вероятности случайного получения $d_{\text{ан}}$ можно принимать $t=t_0$.

Рассчитав $d_{\text{ан}}$ по результатам анализа данных 12 гидрологических съемок Рыбинского водохранилища с использованием перечисленных

ные признаки, мы получили среднюю величину $d_{\text{зн}} = 2.4 \pm 0.3$. С вероятностью случайного превышения, лежащей в пределах 0.05—0.01, эту среднюю величину $d_{\text{зн}}$ можно принять значимой для отнесения двух станций к различным водным массам во всех съемках Рыбинского водохранилища независимо от сезона года.

В качестве примера использования указанного статистического метода к выделению водных масс Рыбинского водохранилища рассмотрим результаты анализа по четырем синхронным съемкам, выполненным в различные гидрологические сезоны в течение одного гидрологического года. Средние значения показателей, стандартные отклонения и коэффициенты вариации по отдельным показателям в этих съемках представлены в табл. 1.

Как было показано, за критерий значимости для d следует принять величину 2.4, т. е. можно предполагать с высокой степенью вероятности (0.95—0.99), что при различии d по комплексу показателей, равному и большему 2.4, рассматриваемые станции принадлежат к двум различным совокупностям или к двум различным водным массам.

Рассмотрение результатов анализа материалов взятых синхронных съемок целесообразно начать с весеннего периода, поскольку, как было показано ранее (Рыбопромысловый атлас Рыбинского водохранилища, 1963; Буторин, 1965, 1966а) и как видно из данных табл. 1, в этот период наблюдается наибольшая неоднородность водных масс в водохранилище.

В предыдущих работах (Буторин, 1965, 1966) было установлено, что районы выхода основных речных потоков в водохранилище весной заполнены водными массами соответствующих рек. Поэтому станции 1-я в Волжском, 36-я в Моложском и 23-я в Шекснинском потоках приняты как исходные, характеризующие водные массы соответствующих рек в более или менее чистом виде. Затем из этих точек (рис. 1, а) проводились линии с указанием на них значений d ко всей совокупности станций, примыкающих к рассматриваемой исходной. В случаях, когда значение d между рассматриваемыми станциями было меньше 2.4, считалось, что они расположены в одной и той же водной массе. Если же d было больше или равнолось 2.4, то в таком случае водные массы на них были различны.

В результате такого приема, как видно на рис. 1, а, удалось четко выделить районы со специфическими водными массами по комплексу признаков. При этом оказалось, что различия d для речных вод и вод центральной части водохранилища достигают значений 5—6. По наибольшей величине d за реперный центр вод центральной части водохранилища была принята станция 14 (рис. 1, б). Анализ величин d станции 14 со всей совокупностью окружающих точек позволил выделить ядро водной массы центральной части водохранилища, которое по своим свойствам наиболее резко отличается от речных водных масс.

В летний период, как это видно из рис. 2, а, для рассматриваемой съемки не удалось выделить Волжской и Шекснинской водных масс в районе наблюдений, и только на станциях 36 и 37 четко определились моложские речные воды. В этом сезоне большая часть водохранилища была заполнена трансформированными водами весеннего половодья, весьма однородными по акватории водохранилища. Никакого ядра вод с резко выраженными свойствами в центральной части водохранилища во время этой съемки не наблюдалось (рис. 2, б).

Большая однородность вод водохранилища летом 1960 г. и отсутствие речных волжских и шекснинских вод в районах выхода соответствующих потоков связаны, по-видимому, с исключительно малым летним стоком, который, например для Волги, составлял всего 0.2 км³.

В осенний период выделяются уже достаточно четко не только моложские, но и волжские речные воды, которые наблюдаются даже в районе

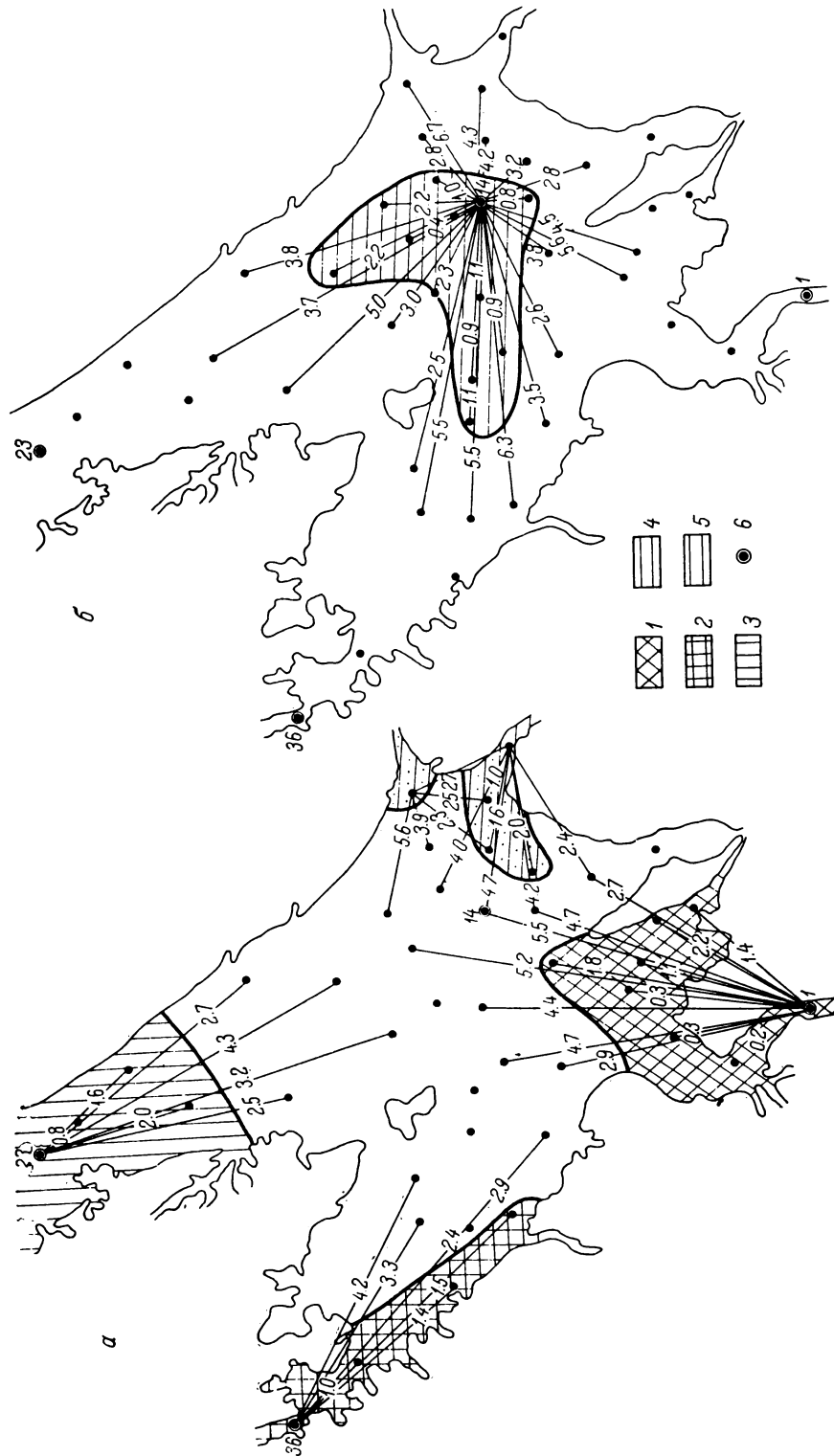


Рис. 1. Схема выделения водных масс в Рыбинском водохранилище весной.

а — речные водные массы; б — водная масса центральной части водохранилища. 1 — Волжская водная масса; 2 — Моложская водная масса; 3 — Шекснинская водная масса; 4 — воды Ухры и Согожи; 5 — ядро вод центральной части водохранилища; 6 — номера реперных станций.

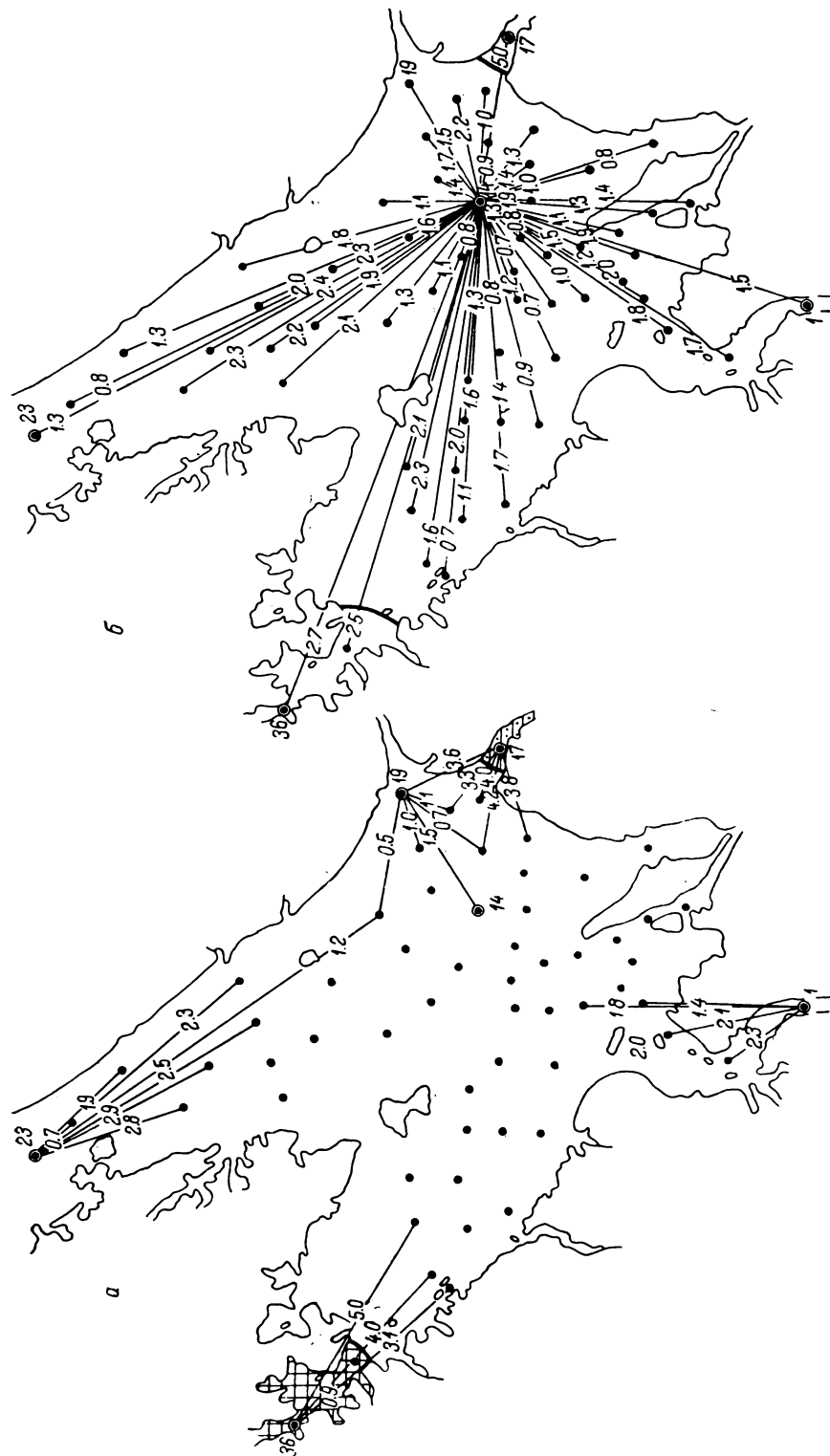


Рис. 2. Схема выделения водных масс в Рыбинском водохранилище летом.
Обозначения те же, что на рис. 1.

Шумаровских островов (рис. 3, а). Это вызвано тем, что Волга в осенний период значительно увеличила сток, который за сентябрь—октябрь составил 1.9 км³. Большая часть водохранилища в этом сезоне, как и летом, была заполнена относительно однородной водной массой (рис. 3, б).

Зимой неоднородность водных масс в Рыбинском водохранилище снова увеличивается. К сожалению, материалы зимних наблюдений весьма ограничены. Так, в феврале 1961 г. не были выполнены станции обычных синхронных съемок в районе выхода в водоем моложского потока, а также 1-я и 2-я станции в волжском потоке. Так как у нас не было материалов для рассматриваемой съемки по исходным точкам, в моложском потоке нам не удалось выделить Моложскую водную массу, а за исходную точку при выделении волжских вод пришлось принять ст. 3 (рис. 4). Это, видимо, повлияло на расширение ареала распространения последних, что сказалось, как будет видно далее, при оценке статистической реальности их выделения в зимний период (табл. 2).

На рис. 4, а видно, что Волжская водная масса в феврале 1961 г. занимала значительную площадь водохранилища и граница ее с водной массой центральной части водохранилища прослеживается очень четко. Значительное увеличение объема волжских вод зимой по сравнению с предшествующим сезоном (рис. 4, а), объясняется большим зимним стоком Волги, который за период с ноября 1960 по март 1961 г. составил 7.4 км³, т. е. в 15 раз превышал летний и в 1.7 раза осенний.

В зимний период удалось выделить и Шекснинскую водную массу. Несмотря на то что зимний сток Шексны был меньше летнего и осеннего, она четко прослеживается в районе исходной станции 23 (рис. 4, а). Наиболее вероятно, что этому способствует отсутствие ветрового перемешивания вод в зимний период, вследствие чего речные водные массы выделяются более отчетливо, чем в летне-осенний период, и имеют резко выраженные границы с водной массой центральной части водохранилища.

Это особенно хорошо видно на рис. 4, б. Как и в весенний период, зимой удалось выделить ядро вод центральной части водохранилища с резко выраженными свойствами, которое формируется и получает наибольшее развитие именно в этом сезоне.

Таким образом, с помощью рассмотренной методики в Рыбинском водохранилище во все сезоны года удастся выделить речные водные массы, приуроченные к районам впадения основных рек, и водную массу центральной части водохранилища, в которой зимой и весной наблюдается четко выраженное ядро вод. Результаты, полученные статистическим методом, в основных чертах подтверждают выводы о наличии и распределении водных масс в Рыбинском водохранилище, полученные другими методами (Буторин, 1965, 1966).

Для того чтобы показать статистическую реальность различий в показателях выделенных нами водных масс в Рыбинском водохранилище, мы воспользовались t -распределением (распределение Стьюдента) для случая сравнения средних двух независимых выборок (Брукс и Карузерс, 1963). Нуль-гипотеза в этом случае заключается в том, что выборки представляют собой ту же совокупность и мы желаем оценить значимость имеющейся разности между их средними.

Если n_1 и n_2 — объемы этих двух выборок, а M_1 и M_2 — их средние значения, то

$$t = \frac{M_1 - M_2}{\sigma \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2}}},$$

где σ является оценкой квадратического отклонения совокупности, из которой взяты выборки.

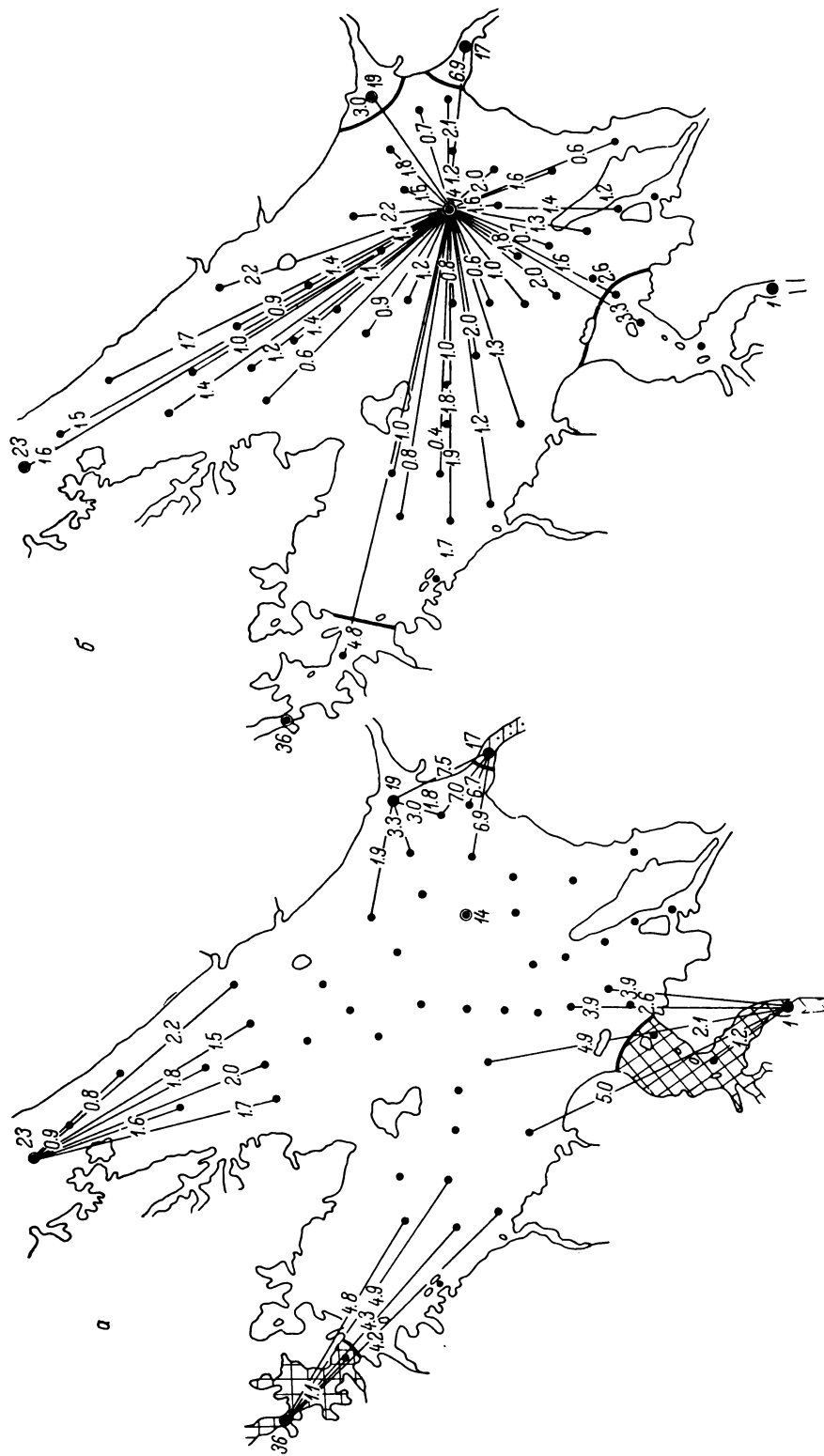


Рис. 3. Схема выделения водных масс в Рыбинском водохранилище осенью.
Обозначения те же, что на рис. 1.

Расчетные значения t в сопоставлении с теоретическими, отражающие определенную вероятность принадлежности выделенных вод к одной водной массе

Показатели	Волжские воды				Моложские воды				Шекснинские воды			
	9 V 1960	28 VII 1960	4 X 1960	14 II 1961	9 V 1960	28 VII 1960	4 X 1960	14 II 1961	9 V 1960	28 VII 1960	4 X 1960	14 II 1961
Температура, °C . . .	3.13	0.08	0.65	1.75	4.15	0.44	0.74	—	1.04	1.46	1.52	1.00
Электропроводность, мксим./см	2.69	1.16	3.62	2.74	3.44	2.33	3.43	—	3.41	0.72	0.11	3.43
Концентрация гидрокарбонатов, мг-экв./л. . .	3.15	0.83	2.76	2.54	3.50	2.53	3.36	—	3.97	0.33	0.33	1.83
Жесткость, мг-экв./л. . .	2.70	0.53	1.94	1.78	3.13	2.00	3.27	—	3.37	0.07	0.72	2.72
Концентрация кальция, мг-экв./л.	2.77	0.88	3.53	1.50	2.41	3.78	3.50	—	3.18	1.50	0.47	3.04
Цветность, град.	2.11	1.70	2.08	2.23	3.42	2.86	0.69	—	3.03	1.70	2.08	0.93
Значение t при вероятности нуль-гипотезы 5 : 100	2.05	2.00	2.01	2.04	2.06	2.00	2.01	—	2.06	2.00	2.01	2.04
Значение t при вероятности нуль-гипотезы 1 : 100	2.76	2.66	2.68	2.75	2.79	2.66	2.68	—	2.79	2.66	2.68	2.75

В нашем случае n_1 — число станций, которые отнесены к водам центральной части водохранилища, а n_2 — к речным водам. M_1 и M_2 представляют собой соответствующие средние значения показателей этих водных масс. Значения σ представлены в табл. 1.

Вычисленные значения t в сравнении с теоретическими значениями, отражающими определенную вероятность реальности принятой нами нуль-гипотезы, приведены в табл. 2. Как уже указывалось выше, для летнего сезона в рассматриваемом случае нам не удалось выделить Шекснинскую и Волжскую водные массы, поэтому для сравнения при выполнении расчетов t мы приняли за первую из них характеристики воды, наблюдавшиеся на станциях 23, 24 и 25, а второй — на станциях 1, 2 и 3. То же самое было сделано и по отношению к Шекснинской водной массе в осенний период.

Как видно из табл. 2, во всех случаях выделения нами в Рыбинском водохранилище водных масс с помощью критерия различия d с принятой величиной значимости его, равной 2.4, по большинству показателей, с вероятностью превышающей 0.05, а в ряде случаев и 0.01, можно полагать, что принятая нами нуль-гипотеза неверна и выделенные нами водные массы являются специфически различными.

Сравнение рассчитанных значений t с теоретическими показывает также и то, что критерий значимости для d определен нами достаточно объективно, ибо в противном случае (например, при $d < 2.4$) имелась возможность выделения в летний период волжских и шекснинских речных вод, а в осенний — шекснинских. Но, как видно из табл. 2, в этом случае мы имели бы различия между показателями речных водных масс и показателями вод центральной части водохранилища, в абсолютном большинстве случаев статистически недостоверные. Данные этой таблицы показывают также, что наиболее характерными и консервативными показателями водных масс в Рыбинском водохранилище являются электропроводность, жесткость, концентрация гидрокарбонатов и кальция. Температура воды относится в какой-то степени к таковым лишь в весенний период.

Все это говорит о том, что рассмотренный статистический метод можно считать вполне пригодным для выделения водных масс в водохранилищах волжского каскада. Преимущество данного метода перед другими заключается прежде всего в том, что он позволяет использовать для выделения водных масс одновременно комплекс различных показателей и имеет статистически обоснованную расчетную основу, позволяющую оценить степень надежности результатов. Кроме того, он дает возможность использовать при выделении водных масс континентальных водоемов современную счетно-вычислительную технику. Положительные результаты статистического метода для выделения водных масс в этих водоемах дают основание полагать, что он может быть использован для подобных целей и в океанологии.

ЛИТЕРАТУРА

- Б р у к с К. и Н. К а р у з е р с. 1963. Применение статистических методов в метеорологии. Гидрометеиздат, Л.
- Б у т о р и н Н. В. 1965. К изучению водных масс Рыбинского водохранилища. В сб.: Динамика водных масс водохр. Тр. Инст. биол. внутр. вод, вып. 7.
- Б у т о р и н Н. В. 1966а. Сезонное изменение характеристик водных масс и распределение их в Рыбинском водохранилище. В сб.: Планктон и бентос внутренних водоемов. Тр. Инст. биол., внутр. вод, вып. 12.
- Б у т о р и н Н. В. 1966б. О вертикальной неоднородности водных масс Рыбинского водохранилища. В сб.: Планктон и бентос внутренних водоемов. Тр. Инст. биол. внутр. вод, вып. 12.
- Д о б р о в о л ь с к и й А. Д. 1961. Об определении водных масс. Океанология, вып. 1.

- Е р ш о в а М. Н. 1968. О применении статистических методов к выделению водных масс в водохранилищах. Бюлл. Инст. биол. внутр. вод, № 2.
- З и м и н о в а Н. А. 1963. Количественная характеристика взвесей Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод, вып. 6.
- К а з а р о в е ц Н. М. 1950. Применение кондуктометрического метода к изучению распределения водных масс Рыбинского водохранилища. Бюлл. Инст. биол. внутр. вод, № 7.
- Ф о р т у н а т о в М. А. 1959. Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатель его режима. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2.
- A t k i n s W. R. G. a. P. G. J e n k i n s. 1955. Identification of Water-Masses by their Suspended Matter. Nature, v. 175, № 4465.
- S c h r ä d e r T. 1956. Talsperren. Urania, H. 2.
- S o k a l R. R. a. S u e a t h. 1963. Principles of Numerical taxonomy. London.
-

ДИНАМИКА ВОД ВОЛЖСКОГО ПЛЕСА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

В связи с изучением течений Рыбинского водохранилища лабораторией гидрологии Института биологии внутренних вод АН СССР были собраны и опубликованы некоторые материалы по неустановившемуся режиму течений в нижнем бьефе Угличской ГЭС (Буторин и Бакулин, 1963; Буторин и Литвинов, 1963). Последующие наблюдения и специальные исследования, проведенные в апреле 1963 г., позволяют в настоящее время более детально охарактеризовать динамику вод в этом районе при наличии ледяного покрова. Поскольку основная цель исследований была связана с изучением режима течений, то наибольшее внимание уделялось изменению скоростей течения по длине Волжского плеса водохранилища в связи с суточным регулированием работы ГЭС.

ГИДРОГРАФИЧЕСКАЯ И МОРФОМЕТРИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Волжский плес Рыбинского водохранилища является нижним бьефом Угличской ГЭС и представляет собой хорошо выраженную речную долину Волги. Общая направленность долины — с юга на север. Граница плеса проходит по линии Дубец—Рожновский мыс. По морфометрическим особенностям плес можно разделить на три участка, основные характеристики которых представлены в табл. 1.

Таблица 1

Основные морфометрические характеристики Волжского плеса
Рыбинского водохранилища

№ участков	При НПУ					При 3.5 м ниже НПУ (апрель 1963 г.)				
	длина, км	площадь, км ²	средняя глубина, м	глубина, по фарва- теру, м	объем, км ³	длина, км	площадь, км ²	средняя глубина, м	глубина по фарва- теру, м	объем, км ³
1	55	73.6	5.4	14.5—21.5	0.396	55	32.7	6.7	11—18	0.22
2	35	220.2	4.2	19.5—21.5	0.929	35	98	4.2	16—18	0.41
3	17	256.2	5.1	21.5—28.5	1.301	17	151.6	3.8	18—25	0.58
Сумма . .	107	550.0	4.8	14.5—28.5	2.626	107	292.3	4.2	11—25	1.21

Ширина первого участка при НПУ изменяется от 500 м в верхней части до 2 км в нижней. Правый берег крутой, обрывистый и является коренным берегом Волги. Левый берег — пологий, представляет собой затопленную часть долины Волги. В нижней части участка ширина затопленной поймы местами достигает 800 м.

Второй участок характеризуется наибольшей шириной, которая увеличивается от Глебова до Легкова с 2 до 7 км за счет хорошо развитой затопленной левобережной поймы, ширина которой достигает 5 км. Крутой правый берег подвержен разрушению, а низменный левый — заболачиванию. В средней и нижней частях участка расположен ряд островов (о-ва Радомский, Хохоткинский, Копринский, Трясье, Шуморовский).

Третий участок плеса представляет собой залив шириной около 15 км, непосредственно граничащий с центральной частью водохранилища. Рельеф дна сложен. Значительную часть площади занимают мелководья с глубинами 2—3 м.

В Волжский плес впадают несколько рек и ручьев, сведения по которым приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2
Гидрографическая сеть Волжского плеса

Притоки	Берег впадения	Расстояние от ГЭС, км	Площадь водосбора, км²
Корожечна	Левый	4.5	1730
Юхоть	Правый	35	1810
Улейма	»	35	716
Сутка	Левый	70	552
Ильдь	»	70	243

Методика наблюдений

Наблюдения за элементами течения в Рыбинском водохранилище, и в частности в Волжском плесе, лабораторией гидрологии Института биологии внутренних вод АН СССР были начаты в 1954 г. Методика и результаты этих исследований опубликованы в работах Н. В. Буторина и К. К. Эдельштейна (1961), Н. В. Буторина и А. С. Литвинова (1963), Н. В. Буторина и К. А. Бакулина (1963).

При постановке исследований динамики вод Волжского плеса в апреле 1963 г. на основании предварительного обследования плеса было намечено три гидрометрических створа (рис. 1). Размещение створов произведено в соответствии со следующими соображениями: 1) учет влияния морфометрических особенностей плеса на трансформацию волн попусков; 2) учет боковой приточности.

Гидроствор № 1 располагался в 33 км от Угличской ГЭС, у пос. Мышкино. Русло на участке гидроствора прямолинейное, трапецеидальной формы со слабо выраженной асимметричностью. На гидростворе было намечено пять скоростных вертикалей, местоположение которых по поперечному сечению распределялось равномерно с учетом характерных переломов рельефа дна.

Гидроствор № 2 располагался в 22 км ниже гидроствора № 1, у Юрьина. Русло на участке прямолинейное, поперечный профиль симметричной корытообразной формы. На гидростворе было намечено пять скоростных вертикалей.

Гидроствор № 3 располагался у Коприна в 17 км ниже гидроствора № 2 и был совмещен с гидрометрическим створом по разрезу Борок—Коприно, являющимся местом многолетних гидрологических и гидробиологических исследований института. Ввиду сложности поперечного профиля для обеспечения наиболее точного определения расходов воды на гидростворе было намечено 11 скоростных вертикалей.

Измерение расходов воды на всех гидростворах производилось синхронно 16 апреля 1963 г. при уровне воды в водохранилище на 3.5 м ниже НПУ. Всего было замерено 12 расходов с затратой времени на каждый измеренный расход до 30 мин. Измеренные расходы воды приурочены к 11, 12, 13 и 14 час. Промеры глубин, измерения толщины льда, расчет рабочих глубин на вертикалях и последующие вычисления средних скоростей течения и расходов воды велись в соответствии с требованиями гидрометрии.

Для характеристики уровня режима исследуемого участка использовались материалы наблюдений на водомерных постах Гидрометслужбы: пос. Мышкино, с. Коприно и мыс Рожновский. Ежечасные уровни в нижнем бьефе Угличской ГЭС и расходы воды были получены непосредственно с ГЭС. Надежность учета стока через последнюю не вызывает сомнений, так как точность тарировки турбин оценивается в 1—2% (Гаврилов, 1963).

РЕЖИМ СРАБОТКИ ВОД УГЛИЧСКИМ ГИДРОУЗЛОМ

Пропуск воды через Угличский гидроузел обычно производится через гидростанцию, максимальная пропускная способность которой

1100 м³/сек. В случае необходимости, кроме того, сброс воды может осуществляться через бетонную плотину, общая пропускная способность которой 11 750 м³/сек. Во время навигации часть воды поступает в нижний бьеф при шлюзовании через однокамерный шлюз.

Среднегодовой расход воды за первые годы существования Рыбинского водохранилища в створе Угличского гидроузла составлял 360 м³/сек. (максимальный 471 и минимальный 309 м³/сек.). За последующий период (с 1948 по 1963 г.) среднегодовой расход воды составлял 394 м³/сек. (на 9.4% выше расхода, приведенного в работе Бюрига) и колебался от 244 до 610 м³/сек.

Так как емкость Угличского водохранилища невелика по сравнению с объемом среднегодового стока (полезная емкость водохранилища 0.809 км³, среднегодовой объем притока 13.5 км³, так что коэффициент емкости равен 0.06) и водохранилище осуществляет неполное сезонное регулирование стока Волги, то колебания среднегодовых расходов через Угличский гидроузел в основном повторяют ход притока в водохранилище.

Таким образом, объем сброшенной через гидроузел воды в многолетнем плане зависит от водности года.

Режим сбросов воды через Угличский гидроузел в течение года отличается значительным непостоянством и зависит от наличия водных ресурсов, про-

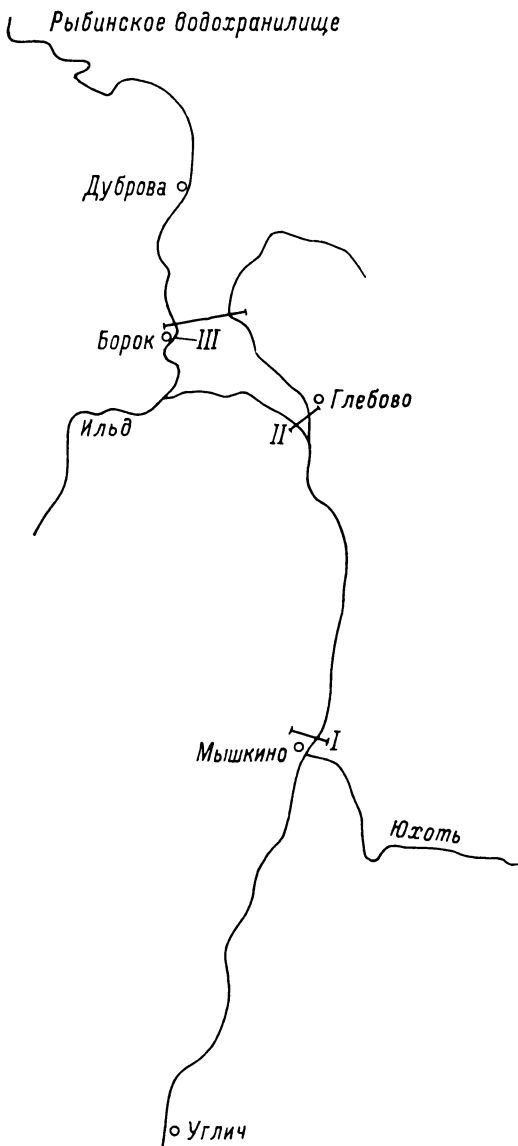


Рис. 1. Схема расположения гидрологических разрезов.

гноза погоды и покрытия нагрузок энергосистемы (Балагуров, 1957). Среднемесячные сбросы через гидроузел колеблются в пределах от 4.3 до 30.3% годового сброса. В осенне-зимний период средняя величина сброса составляет 5.2—6.7% от годового. В отдельные годы отмечаются значительные изменения внутригодового распределения сброса воды, которые в основном связаны с гидрометеорологическими условиями года.

Кроме изменения годовых и месячных сбросов воды, на гидродинамический режим нижнего бьефа ГЭС сильное влияние оказывает и внутрисуточная неравномерность поступления вод через Угличский гидроузел. Так как режим работы станции зависит от покрытия нагрузок энергосистемы (Балагуров, 1957), а энергопотребление имеет резко выраженный суточный ход, то и поступление воды через ГЭС в течение суток весьма неравномерно.

В осенне-зимний период (с сентября по февраль) ГЭС работает в пиковом режиме в основном за счет притока и частичной сработки водохра-

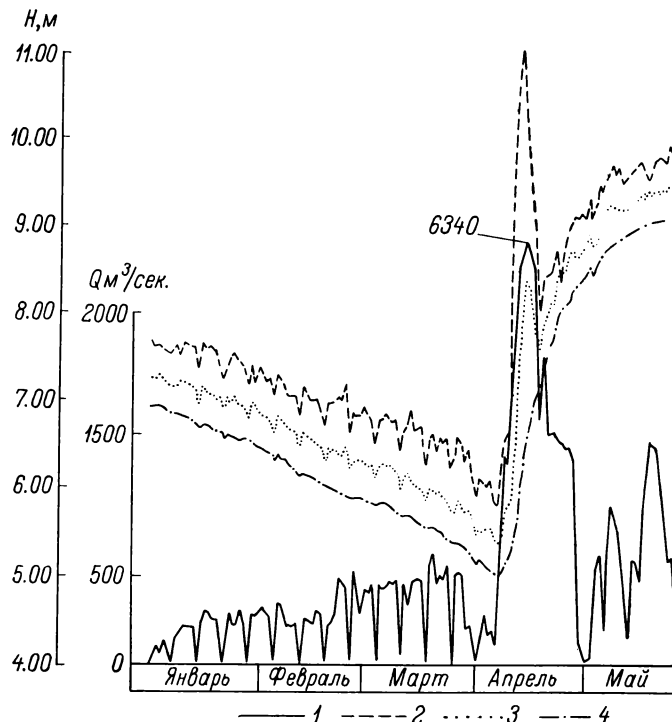


Рис. 2. Хронологический график изменения уровней в Волжском плесе и расходов воды через Угличскую ГЭС.

1 — среднесуточные расходы воды через Угличскую ГЭС; 2 — среднесуточные уровни в нижнем бьефе ГЭС; 3 — среднесуточные уровни у Мышкина; 4 — среднесуточные уровни у Коприна.

нилища. Среднесуточные сбросы изменяются от 200 до 400 м³/сек. Продолжительность работы ГЭС составляет обычно 2.5—4 часа. С началом работы Угличской ГЭС срабатываемые в нижний бьеф расходы воды за короткий промежуток времени возрастают от 4 (расход воды на фильтрацию) до 1100 м³/сек. (расход при полной нагрузке). С середины марта начинается подготовка Угличского водохранилища к пропуску половодья, и оно срабатывается до предельной отметки в зависимости от прогноза весеннего половодья. В связи с этим увеличивается продолжительность работы ГЭС до 12—18 час. в сутки. Среднесуточные расходы воды возрастают до 500—800 м³/сек.

Ежедневное чередование максимумов и минимумов сбросов нарушается в нерабочие дни, когда из-за падения нагрузки в энергосети ГЭС не работает. Поступление воды в нижний бьеф в такие дни определяется в зимний период фильтрацией или незначительными холостыми сбросами. Дни минимального сброса хорошо заметны на гидрографе среднесуточных расходов воды Угличской ГЭС за 1963 г., приведенном на рис. 2.

В апреле 1963 г. наблюдения проводились в период подготовки Угличского водохранилища к пропуску весеннего половодья. С 1 по 16 апреля среднесуточные сбросы воды через ГЭС увеличились от 130—160 до 500—530 м³/сек., а с 17 апреля через Угличский гидроузел начался пропуск весеннего половодья. 16 апреля ежедневные расходы воды через ГЭС изменялись от 390 до 884 м³/сек. Среднесуточный сброс воды составил 503 м³/сек.

Уровенный режим

Уровенный режим Волжского плеса Рыбинского водохранилища в основном определяется режимом сработки вод Угличским гидроузлом. Наиболее отчетливо эта зависимость прослеживается в зимний период, когда практически отсутствуют колебания уровня, связанные с воздействием ветра на водную поверхность. В связи с тем что в воскресные дни из-за падения нагрузки в энергосети ГЭС не работает, на фоне общего понижения уровня Волжского плеса отчетливо прослеживаются периодические падения его за счет опорожнения плеса. Амплитуда этих колебаний у Угличской ГЭС достигает 40—50 см (рис. 2). С удалением от ГЭС влияние последней на колебания уровня постепенно уменьшается, и в районе Мышкина амплитуда их составляет 20—25 см, а у Коприна (70 км от ГЭС) уже не превышает 5—10 см.

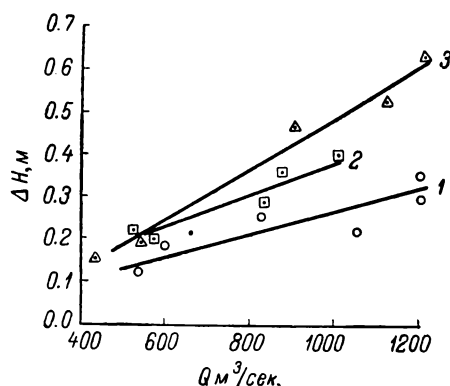


Рис. 3. Зависимость высоты прямой продолжительной волны у Угличской ГЭС от расхода и уровня воды в нижнем бьефе.

1 — при уровне нижнего бьефа на 1.8 м ниже НПУ; 2 — при уровне нижнего бьефа на 2.6 м ниже НПУ; 3 — при уровне нижнего бьефа на 3.1 м ниже НПУ.

Кроме недельных колебаний, в Волжском плесе отчетливо прослеживаются и внутрисуточные колебания уровня, которые обусловлены прохождением волн попусков, вызванных суточным регулированием сброса воды через Угличскую ГЭС (Литвинов, 1968). Длинные волны, возникающие в нижнем бьефе ГЭС в результате попусков воды через последнюю в зависимости от направления их движения, обычно разделяются на прямые (распространяющиеся по течению) и обратные (распространяющиеся против течения), а по форме

на положительные (волны повышения) и отрицательные (волны понижения) (Егизаров, 1937; Архангельский, 1947).

При попусках расходы воды через Угличскую ГЭС в зимний период за короткий интервал времени могут изменяться от 4 до 1100 м³/сек.; это вызывает в нижнем бьефе возникновение прямой положительной волны. Интенсивность подъема уровня в первый час после начала попуска может достигать 50 см. Дальнейшая стабилизация расходов через ГЭС дает незначительное повышение уровня по мере заполнения бьефа. На рис. 3 показана зависимость высоты прямой положительной волны у Угличской ГЭС от величины расхода и уровня воды в нижнем бьефе. Для избежания влияния наложения волн при построении данной зависимости использовались только первые попуски после воскресного провала в работе ГЭС, когда уровень в нижнем бьефе перед попуском можно было считать близким к среднему уровню водохранилища. Из рисунка видно, что высота волны повышается с понижением уровня нижнего бьефа (уровня Рыбинского водохранилища) и с увеличением расхода воды при попуске, изменяясь от 0.15 до 0.60 м.

Волна повышения, распространяясь вниз по бьефу за счет сил сопротивления и трения, с одной стороны, и увеличения площади водного сечения — с другой, расплывается, что приводит к значительному уменьшению ее высоты и сглаживанию профиля. Вследствие этого колебания уровня в створе Коприна значительно меньше, чем у ГЭС, и сдвинуты по фазе. Наступление максимальных и минимальных уровней в створе Коприна запаздывает на 1—3 часа по сравнению с экстремными уровнями у Угличской ГЭС. С дальнейшим удалением от ГЭС наблюдается увеличение сдвига во времени наступления максимальных и минимальных уровней и продолжительности их стояния. В районе Рожновского мыса (около 100 км от ГЭС) колебания уровня заметны только по экстремным величинам.

Пройдя Волжский плес, прямая положительная волна отражается от водной массы Центральной части водохранилища (отражение ее происходит в районе Рожновский мыс—Зональная) и перемещается вверх по плесу в виде обратной отрицательной волны.¹

В период падения нагрузки в энергосистеме у ГЭС возникает второе возмущение, вызванное резким уменьшением расхода, и образуется прямая отрицательная волна. Уровень воды в начале быстро падает, а затем начинается более медленное понижение его по мере опорожнения плеса. При подходе к створу ГЭС обратной отрицательной волны происходит дополнительное понижение уровня и возникает вторая прямая отрицательная волна. Отражение этих двух волн от водной массы центральной части водохранилища образует две обратные положительные волны, которые, подойдя к ГЭС, вызывают повышение уровня на Угличском водохранилище.

Таким образом, волновые перемещения в нижнем бьефе ГЭС, вызванные отдельным попуском, образуют полный волновой цикл, состоящий из следующих волн: прямой положительной волны, обратной отрицательной, двух прямых отрицательных волн и двух обратных положительных волн. В случае отсутствия последующих вынужденных возмущений, обусловленных работой ГЭС, следующий цикл начинается с прямой положительной волны. Наиболее отчетливо волновой цикл прослеживается в период воскресного провала в нагрузке на ГЭС, когда у ГЭС можно проследить колебания уровней на протяжении трех циклов. В створе же Коприна наиболее отчетливо заметны лишь первый и второй циклы (Литвинов, 1968).

Скорость распространения волн в Волжском плесе Рыбинского водохранилища на участке Углич—Коприно составляет около 10 м/сек. (Литвинов, 1968).

В ходе суточного регулирования сбросов воды через Угличскую ГЭС в результате наложения волн картина колебаний уровня значительно усложняется, а амплитуда колебаний у Углича может увеличиваться до 1 м. В створе Коприна колебания уровня, как правило, не превышают 0.2 м.

Наиболее значительные изменения уровня в Волжском плесе Рыбинского водохранилища наблюдаются в период пропуска весеннего половодья. Так как среднесуточные расходы воды через Угличскую ГЭС в этот период возрастают в 10—15 раз, то интенсивность подъема уровня в нижнем бьефе ГЭС может достигать 260 см/сутки (1955 г.), тогда как подъем среднего уровня водохранилища в период наполнения редко превышает 20—30 см/сутки и лишь в исключительных случаях достигает 70 см (Буторин и Литвинов, 1963). В результате этого в Волжском плесе наблюдаются значительные кратковременные подъемы уровня. Так, во

¹ При отражении волны от водной массы широкого водоема волна меняет знак (Грушевский, 1962).

второй декаде апреля 1962 г. у Углича уровень за 5 суток (с 10 по 15 IV) поднялся на 5 м, средний же уровень водохранилища за тот же период повысился только на 97 см. Превышение уровня у Углича над уровнем центральной части водохранилища в момент максимального подъема его составляло 4.03 м. В маловодный 1963 г. превышение максимального уровня у Углича в момент пропуска весенних вод над уровнем центральной части водохранилища было значительно меньше и составляло 1.69 м.

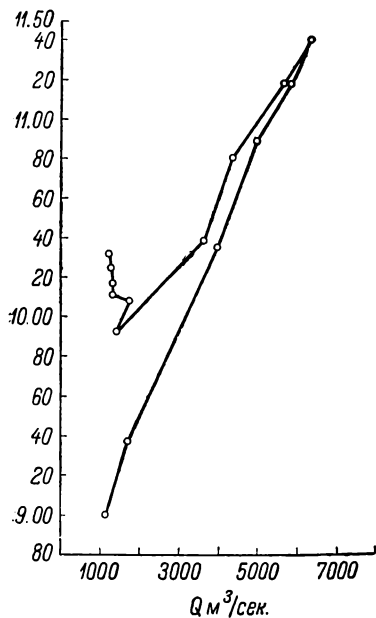


Рис. 4. Кривая $Q=f(H)$ в нижнем бьефе Угличской ГЭС в период пропуска весеннего половодья.

Ордината — уровень, м.

Продолжительность резких подъёмов уровня обычно составляет 3—5 дней. С уменьшением сбросов воды через ГЭС в течение такого же периода времени уровень быстро падает (рис. 2). Величина падения уровня в многоводные годы у г. Углича может достигать 3 м, а затем он снова повышается в связи с продолжающимся наполнением водохранилища. Описанный ход уровня в Волжском плесе прослеживается на водомерных постах у Углича и Мышкина. Причем в момент максимальных сбросов воды через ГЭС в многоводные и средние по водности годы у г. Углича уровень может быть значительно выше максимального уровня наполнения водохранилища. Ход уровня на водомерном посту Коприна уже отражает характер повышения среднего уровня водохранилища (Буторин и Литвинов, 1963).

На рис. 4. представлен график зависимости $Q=f(H)$ для района Угличского гидроузла в период пропуска весеннего половодья в 1962 г. Из рисунка видно, что на подъеме уровня и в первый период спада наблюдается обычная при паводках закономерность, т. е. одни и те же объемы воды проходят при более низких уровнях, чем при спаде. При уменьшении расходов воды через ГЭС кривая спада отодвигается от кривой подъема (в отличие от незарегулированных рек) и при расходах 1200—1600 м³/сек. и уровне нижнего бьефа приблизительно на 2 м ниже НПГ зависимость между уровнями и расходами воды нарушается. Дальнейшее изменение уровня уже отражает общее наполнение Рыбинского водохранилища.

Уклоны водной поверхности

В Волжском плесе Рыбинского водохранилища постоянные уклоны водной поверхности отсутствуют. Так как нижний бьеф Угличской ГЭС в течение всего года находится в подпоре от водохранилища, то при отсутствии внешних возмущающих сил уровень в Волжском плесе остается горизонтальным и совпадает со средним уровнем водохранилища.

Основными внешними силами, нарушающими динамическое равновесие уровня и приводящими к возникновению продольных уклонов в плесе, являются сбросы воды через Угличскую ГЭС и воздействие ветра на водную поверхность. В зимний период, когда водная поверхность изолирована от непосредственного действия ветра ледяным покровом, основная роль в образовании продольных уклонов принадлежит периодическим пропускам воды через Угличскую ГЭС.

С возникновением прямой положительной волны в момент пуща воды в результате интенсивного подъема уровня образуются положительные уклоны водной поверхности (направленные в сторону бытового уклона волжского потока). Максимальной величины положительные уклоны достигают в период прохождения у Угличского водомерного поста гребня прямой положительной волны.

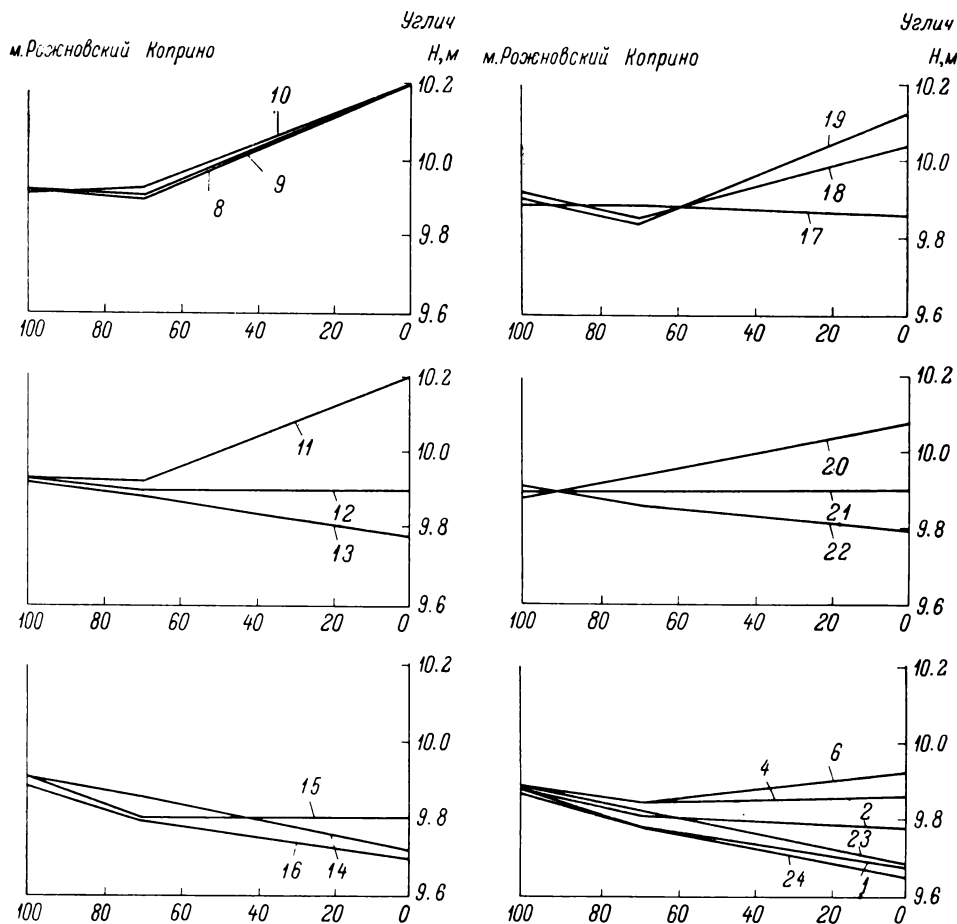


Рис. 5. Схематические мгновенные профили водной поверхности в Волжском плесе с 8 час. 25 I по 6 час. 26 I 1963.

Цифры на кривых — часы суток.

При прекращении сбросов и возникновении прямой отрицательной волны происходит интенсивное падение уровня у Углича, что приводит к возникновению на участке Углич—Коприно отрицательного уклона, направленного против бытового, величина которого увеличивается при подходе к ГЭС обратной отрицательной волны.

Последующее уменьшение отрицательных уклонов и переход их в положительные происходит при подходе к ГЭС обратной положительной волны, при прохождении гребня которой положительные уклоны достигают наибольшей величины. Таким образом, положительные уклоны в Волжском плесе наблюдаются при прохождении положительных волн (волн повышения), а отрицательные — при прохождении отрицательных волн (волн понижения). На рис. 5 схематично показаны мгновенные про-

дольные профили водной поверхности в Волжском плесе водохранилища. Промежуток времени между двумя максимальными значениями уклонов одного знака при отсутствии последующих сбросов (например, в воскресные дни), равен периоду полного волнового цикла и в среднем составляет 10 час. (Литвинов, 1967).

Абсолютная величина максимальных положительных и отрицательных уклонов зависит от отметки уровня в водохранилище и величины сбросных расходов, изменяясь в течение зимы от 0.005 до 0.008‰ и от 0.002 до 0.005‰ соответственно. К концу зимнего периода в результате понижения уровня в Волжском плесе за счет зимней сработки Рыбинского

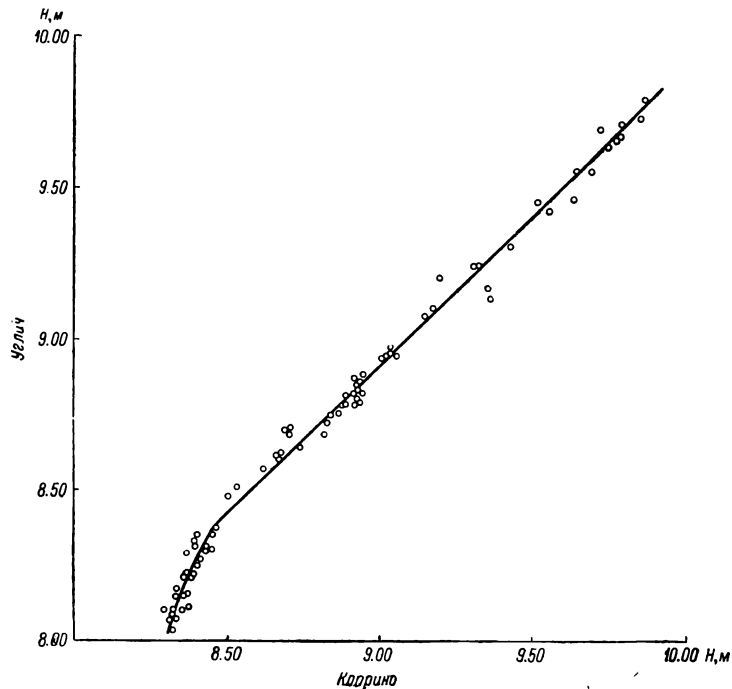


Рис. 6. Кривая минимальных соответственных уровней между постами Коприно—Углич.

водохранилища при одинаковых по величине попусках наблюдается тенденция к увеличению уклонов водной поверхности. Так, например, кривая связи минимальных соответственных уровней между постами Коприно—Углич (рис. 6) показывает, что в течение зимы среднее превышение минимального уровня у Коприна над минимальным уровнем у Углича составляет около 10 см. С понижением уровня в Волжском плесе до 9.3 м и ниже разность в соответственных уровнях увеличивается.

Максимальные уклоны водной поверхности в Волжском плесе водохранилища наблюдаются в период пропуска весеннего половодья через Угличский гидроузел. Как уже отмечалось, в этот период в результате интенсивных сбросов воды создается постоянный перекося водной поверхности. Продолжительность этого периода зависит главным образом от водности года и в среднем составляет 10—15 дней (табл. 3). Величина уклона в период максимальных расходов воды через ГЭС в многоводные годы может достигать 0.05—0.06‰, т. е. превышать уклоны при обычных попусках в 7—8 раз. В маловодные же годы максимальные уклоны обычно не превышают 0.02—0.03‰.

Т а б л и ц а 3

Среднесуточные продольные уклоны водной поверхности
на участке Углич—Коприно

Многоводный 1962 г.		Маловодный 1963 г.		Многоводный 1936 г.		Маловодный 1937 г.	
дата	уклон, ‰	дата	уклон, ‰	дата	уклон, ‰	дата	уклон, ‰
5 IV	0.001	15 IV	0.006	10 I	0.083	10 I	0.073
10 IV	0.009	20 IV	0.0090	20 II	0.074	20 II	0.071
15 IV	0.052	22 IV	0.024	10 IV	0.091	20 III	0.072
16 IV	0.043	24 IV	0.015	20 IV	0.113	30 III	0.092
18 IV	0.017	26 IV	0.004	30 IV	0.061	1 IV	0.094
20 IV	0.003					10 IV	0.075

Сопоставляя уклоны водной поверхности на участке Углич—Коприно, возникающие в ходе суточного регулирования работы Угличской ГЭС с бытовыми уклонами р. Волги на этом же участке, видим, что в результате значительного повышения уровня после наполнения Рыбинского водохранилища максимальные положительные уклоны в 10 раз меньше бытовых, тогда как расходы воды через ГЭС в зимний период при пусках по сравнению с бытовыми увеличились в 8—10 раз. Только при пропуске весеннего половодья в многоводные годы максимальные уклоны (на участке) приближаются по величине к бытовому уклону, но в 1.5—2 раза меньше бытового уклона, наблюдавшегося в половодье.

Течения

Наблюдения в Волжском плесе, проведенные за ряд лет, показали, что течения на этом участке водохранилища носят периодический характер (Буторин и Литвинов, 1963). Режим их обусловлен главным образом сработкой вод из Угличского водохранилища. Так как сбросы воды через Угличскую ГЭС имеют четко выраженные сезонные изменения, то и режим течений существенно изменяется в течение года. Поскольку в зимний период водная поверхность изолирована от непосредственного воздействия ветра ледяным покровом и ведется интенсивная сработка Угличского водохранилища, то в Волжском плесе существуют только стоковые течения.

Исследования показали, что максимальные скорости течения наблюдаются в районе Угличской ГЭС и постепенно уменьшаются с удалением от нее. Уменьшение скоростей потока происходит в основном за счет увеличения площади водного сечения. Абсолютная величина скорости течения зависит от расхода воды через Угличскую ГЭС и изменяется в широких пределах. При расходах воды через ГЭС 1100—1200 м³/сек. максимальные скорости течения в марте 1963 г. по длине плеса составляли у Мышкина 45, у Юрьина 35, у Коприна 30 см/сек. и на выходе волжского потока в центральную часть водохранилища у бывшего г. Мологи 10 см/сек. На значительное ослабление потока с удалением от ГЭС указывает также тот факт, что в 70 км и ниже часть пусков с максимальными расходами до 400 м³/сек. уже не вызывает заметных скоростей течения.

Особенности режима течений в Волжском плесе водохранилища хорошо прослеживаются по материалам синхронных наблюдений, выполненным по длине плеса в 1963 г., которые представлены на рис. 7.

С началом сброса воды и возникновением прямой положительной волны в Волжском плесе появляются и заметные скорости течения. При-

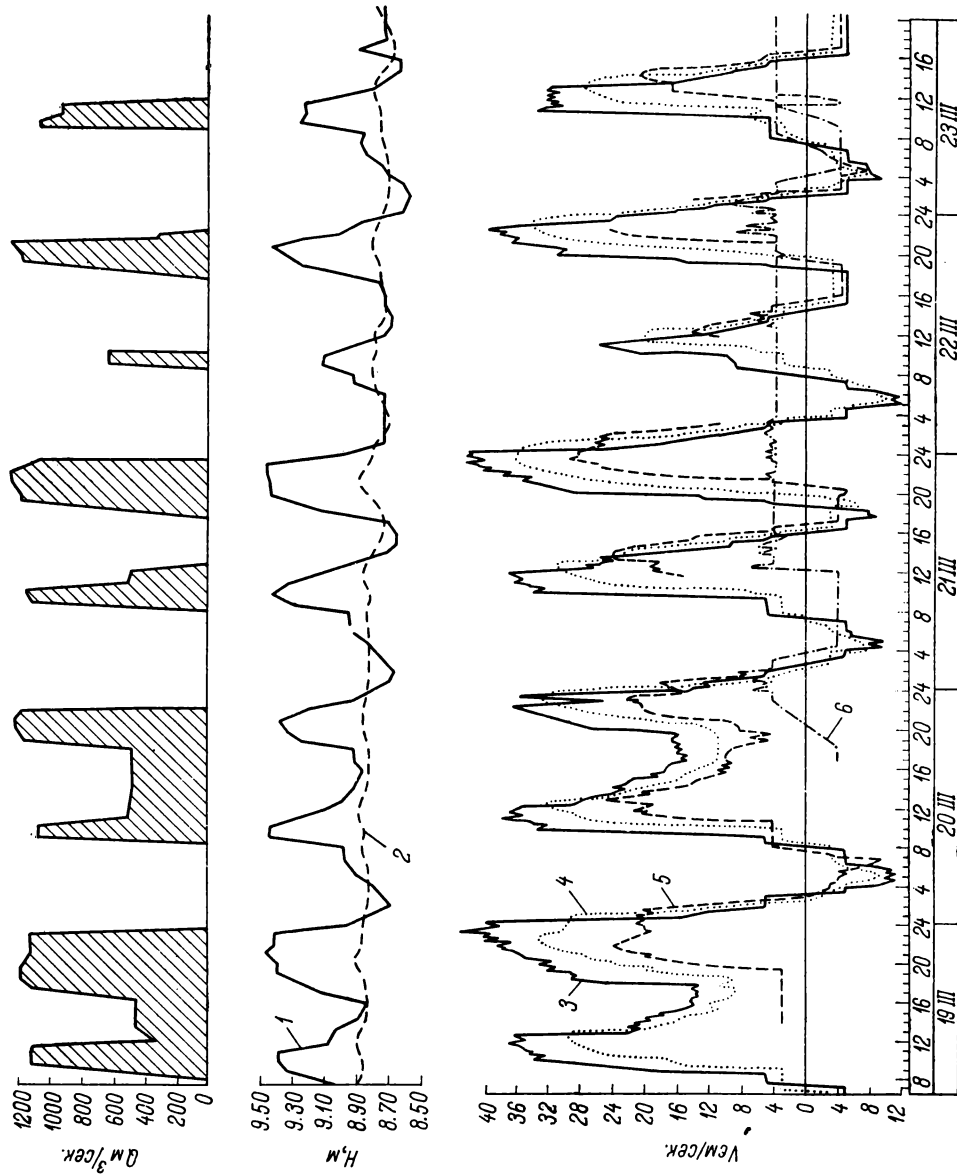


Рис. 7. Совмещенный график изменения уровней, скорости течения в Волжском плесе и расходов через Угличскую ГЭС с 19 по 23 III 1963.

1 — изменение уровня у Углича; 2 — изменение уровня у Коприна; 3 — скорость течения у речного пос. Мышкино; 4 — скорость течения у Юрьина; 5 — скорость течения у Коприна; 6 — скорость течения у бывшего г. Молога.

чем течение появляется не одновременно по всему плесу, а с некоторым сдвигом во времени, увеличивающимся по мере удаления от ГЭС. Величина этого сдвига зависит от скорости распространения волны. Так, например, заметные скорости течения в районе Мышкина появляются спустя 1 час после начала сбросов, а у Коприна после 2—3 час.

Продолжительность существования течения в Волжском плесе зависит от продолжительности сбросов воды через ГЭС. По мере удаления от ГЭС происходит некоторое увеличение продолжительности существования течения. Это обстоятельство связано с тем, что одни и те же объемы воды вследствие расплывания волн попусков по мере удаления от ГЭС проходят через заданный створ за более длительный интервал времени. При средней продолжительности сбросов в начале зимы 1—4 часа продолжительность течения у Коприна составляет 1.5—5 час. В период предвесенней сработки Угличского водохранилища при подготовке его к пропуску весеннего половодья продолжительность сбросов воды увеличивается. В соответствии с этим начиная с марта продолжительность течения увеличивается до 6—8, а в отдельные сутки до 18 час (рис. 7). При продолжительности течения свыше 10 час., как правило, вследствие изменения расходов воды через ГЭС наблюдается два пика максимальных скоростей. В процессе развития течения при суточном регулировании сбросов воды через ГЭС в результате наложения волн попусков время нарастания скоростей до максимальных в одних случаях больше времени затухания, а в других — меньше.

Абсолютная величина скорости течения в Волжском плесе водохранилища зависит не только от величины максимального расхода воды через ГЭС, но также от уровня воды в водохранилище и от продолжительности максимального сброса, т. е. от объема воды, сброшенной через ГЭС.

Например, в декабре—январе 1961/62 г. в отличие от приведенных данных при тех же по абсолютной величине максимальных расходах воды, но при меньшей их продолжительности и более высоком уровне водохранилища скорости течения у Коприна составляли 12—18 см/сек. Понижение уровня в Волжском плесе в результате зимней сработки Рыбинского водохранилища приводит к уменьшению площади водного сечения потока и к увеличению уклонов водной поверхности. Так, при понижении уровня на 2 м в районе Коприна площадь водного сечения уменьшается на 52% (табл. 4)

Т а б л и ц а 4

Изменение площади водного сечения и скорости потока
в районе Коприна при различных уровнях Рыбинского
водохранилища

Дата	Средний уровень водохранилища, усл. ед.	Площадь водного сечения, м ²	Максимальный расход через ГЭС, м ³ /сек.	Максимальная скорость течения, см/сек.
10—12 IV 1960	7.30	7858	1050—1150	32—34
1 IV 1961	9.30	11988	1100	18
19 II 1962	9.50	12441	950—1000	16
30 III 1962	8.20	9743	1050—1200	22—26
1—3 IV 1962	8.80	10906	1050—1200	18—20

Кроме того, в условиях зимы водная поверхность покрыта ледяным покровом, который на расстоянии 70 км от ГЭС спаян с берегом. Поэтому при прохождении волн попусков создаются условия трубы, в которой

лед (как одна из стенок) обуславливает напорные условия, изменяющиеся при одних и тех же расходах воды, но при различных площадях водного сечения. Таким образом, уменьшение площади водного сечения при одном и том же расходе вызывает увеличение скорости потока.

На рис. 8 по ежечасным уровням и расходам представлена зависимость $Q=f(H)$ для одного из попусков Угличской ГЭС. Из рис. 8 видно, что с началом попуска после воскресного провала в работе ГЭС при резком увеличении расходов наблюдается интенсивный подъем уровня. В дальнейшем при практически постоянном расходе воды через ГЭС уровень продолжает заметно повышаться за счет заполнения бьефа. С уменьшением расхода воды через ГЭС уровень интенсивно понижается, причем одни и те же расходы на спаде проходят при более высоком уровне, чем на подъеме, т. е. отчетливо выражена петля, указывающая на неустойчивый характер движения воды. При стабилизации расхода воды уровень продолжает понижаться по мере опорожнения бьефа. Последующее увеличение расхода вызывает следующее повышение уровня.

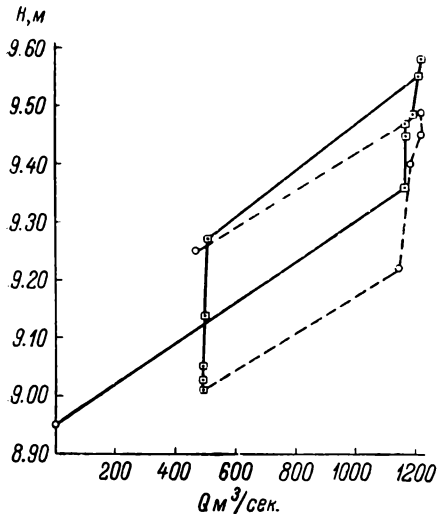


Рис. 8. Кривые $Q=f(H)$ в нижнем бьефе Угличской ГЭС 11 III 1963.

Таким образом, у ГЭС, очевидно, наблюдается обычная при паводках закономерность — раньше всего достигают максимума значения скорости, затем расхода и, наконец, уровня. На это указывает также и Н. Н. Федоров (1965) на основании анализа материалов по неустойчивому движению на р. Тверце. Однако по мере удаления от ГЭС

вследствие распада попуска эта закономерность нарушается. Максимальные скорости течения во всех трех створах (Мышкино, Юрьино, Коприно) при продолжительности попусков 1—4 часа обычно наблюдаются на спаде уровня, а не в момент его максимального подъема и отмечаются сначала в верхних створах, а затем в нижних. Это связано с тем, что часть объемов воды в период подъема уровня по мере удаления от ГЭС при попуске расходуется на заполнение поймы, а в период спада возвращается в русло. Подобное явление приводит к уменьшению расходов воды, идущих по руслу на подъеме уровня, и увеличивает их на спаде (Грушевский, 1965). Таким образом, с удалением от ГЭС первоначально максимальной величины достигают значения уровня, затем уклонов, скорости течения и расходов воды.

В случае более продолжительного попуска через ГЭС (например, вечерний попуск 19 III, рис. 7), когда после отражения прямой положительной волны от водной массы центральной части водохранилища по плесу распространяется обратная отрицательная волна, максимальные скорости течения наблюдаются сначала в нижних створах, а затем в верхних, так как прохождение этой волны сопровождается увеличением расходов воды в заданном створе.

Прохождение по плесу прямой отрицательной волны, вызванной уменьшением сбросов через Угличскую ГЭС, а затем обратной положительной, приводит к резкому уменьшению скоростей течения и расходов воды, которые могут принимать отрицательное значение (рис. 7); при этом происходит изменение направления течения на противополож-

ное.

ное. Смена направления течения в створе с. Коприно начинается спустя 3—4 часа после прекращения сбросов воды и происходит в течение 20—60 мин. (Буторин и Литвинов, 1963). Максимальные скорости при обратном направлении течения составляют 8—12 см/сек. и наблюдаются, как правило, через 5—6 час. после прекращения сбросов, т. е. в момент прохождения по плесу обратной положительной волны, распространение которой связано с некоторым повышением уровня и с уменьшением расходов (Грушевский, 1962).

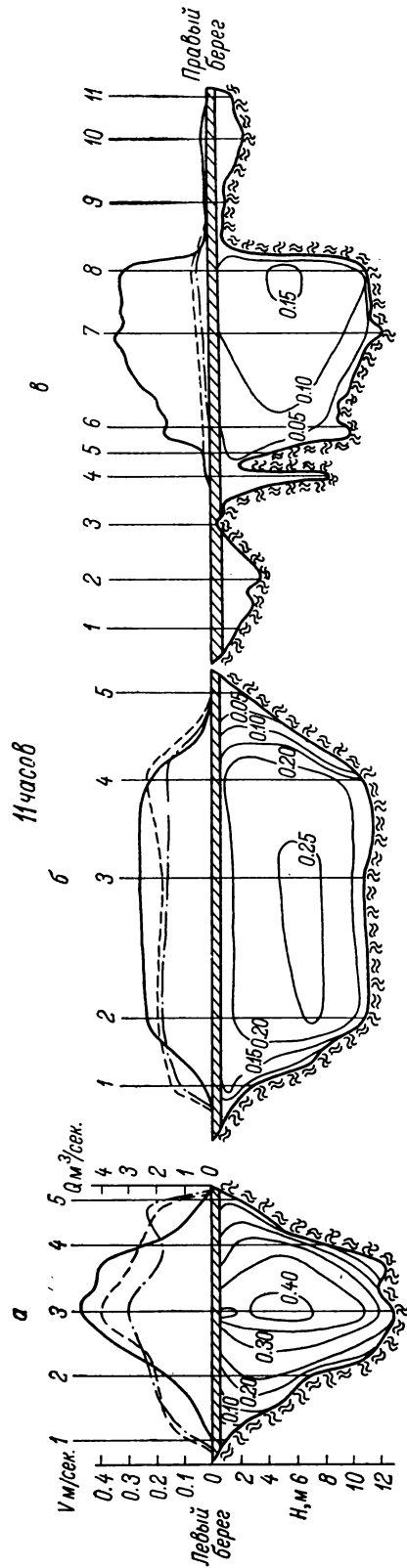
О вертикальном распределении скоростей течения и структуре скоростных полей по длине Волжского плеса можно судить по материалам, представленным на рис. 9 и 10. Из приведенных данных видно, что в створах Мышкина и Юрьина, где практически отсутствовали участки с затопленной поймой и поток располагался в коренном русле Волги, скоростное поле охватывает все водное сечение. В створе Коприна, несмотря на значительные площади затопленной поймы, основное скоростное поле также придерживается коренного русла Волги. Пойменные участки разреза являются лишь аккумулялирующими емкостями и практически не проточны. Незначительные скорости течения наблюдались только на правобережной пойме. Аналогичные результаты для данного створа были получены и в 1962 г. (Буторин и Бакулин, 1963), хотя разность в скоростях течения достигала 20 см/сек.

Рассматривая изменение структуры скоростных полей во времени (с 11 до 14 час 16 IV), видим, что во всех трех створах наблюдалось некоторое увеличение средних скоростей течения, которое в целом для створа выражалось в увеличении площади сечения с максимальными скоростями.

Анализ распределения скоростей течения на стрежневых вертикалях створов (рис. 10) показывает, что минимальное относительное (по отношению к средней скорости) изменение скоростей в створах Мышкина и Юрьина наблюдалось на горизонтах 0.4—0.6 м, где оно не превышало 5%, а наибольшее было в поверхностных и придонных слоях. Причем, если в створе Мышкина перестройка скоростного поля потока привела к значительному (до 30%) относительному уменьшению поверхностной скорости и к увеличению (до 15%) придонной скорости, то в створе Юрьина наблюдалось постоянное увеличение поверхностной скорости (до 15%) и увеличение, а затем понижение придонной. В целом же за весь период наблюдений поверхностная скорость была несколько выше придонной (до 5%).

В створе Коприна максимальное относительное изменение скорости наблюдалось в 14 час. на горизонте 0.4 м и у дна. В поверхностном слое, так же как и в створе Юрьина, отмечалось незначительное повышение скорости, но она была на 20, а в 14 час. на 30% ниже придонной. Таким образом, несмотря на то что режим потока был близким к установившемуся, происходила непрерывная перестройка эпюр скоростей, при которой наиболее значительные изменения отмечались в поверхностных и придонных горизонтах. Характер этой перестройки, очевидно, зависит от морфометрических особенностей русла на данном участке и турбулентности потока.

Большой теоретический и практический интерес представляет также характер изменения поверхностной и придонной скорости потока в период интенсивного увеличения или уменьшения скоростей течения в данном створе при прохождении расходов через ГЭС. Материалы синхронных наблюдений на горизонтах 0.2 и 0.8 м русловой вертикали в створе Коприна, полученные в марте 1962 г. (рис. 11) с помощью самописцев БПВ-2-р, показывают, что в период интенсивного увеличения скоростей при прохождении прямой положительной волны наблюдается значительное превышение по абсолютной величине придонных скоростей над по-



верхностными, т. е. на горизонте 0.8 м заметные скорости течения появляются на 10—20 мин. раньше, чем на горизонте 0.2 м. В дальнейшем при увеличении скоростей до максимальных происходит их выравнивание, и абсолютные величины скорости на том и другом горизонте мало отличаются. В период резкого уменьшения скоростей наблюдается обратная картина, т. е. вследствие того что на горизонте 0.8 м скорости течения

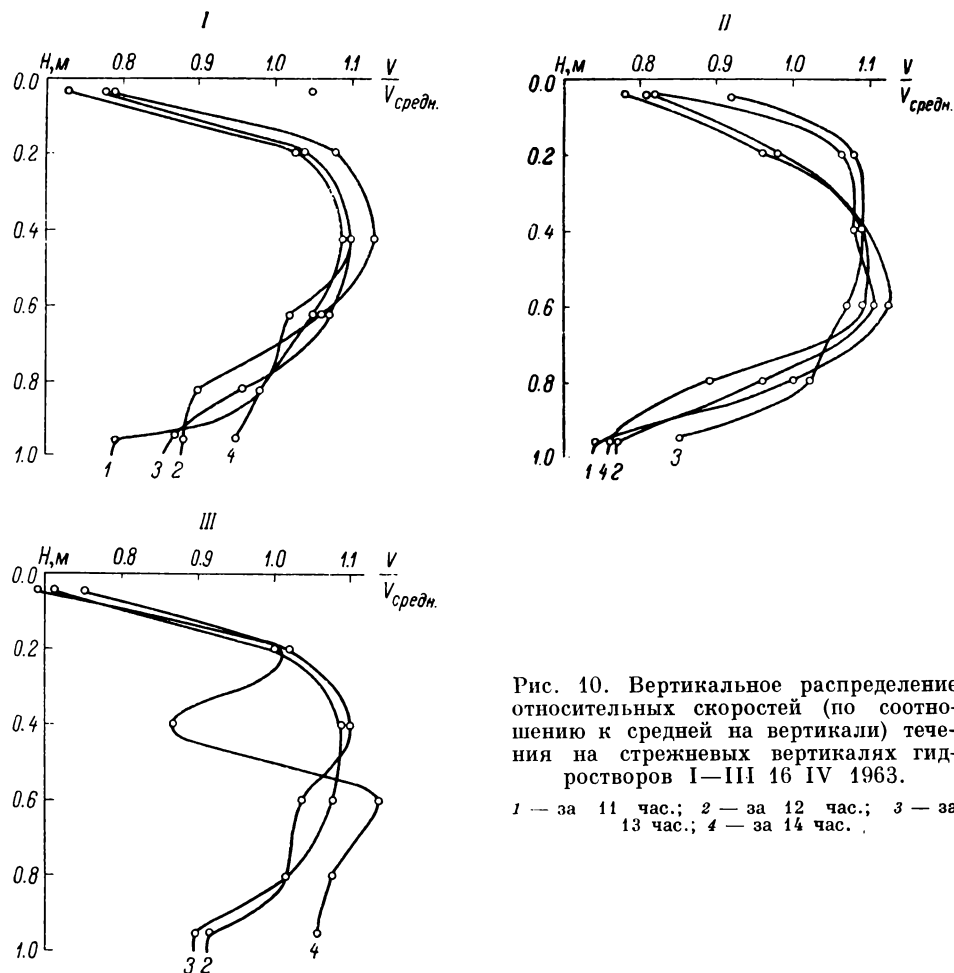


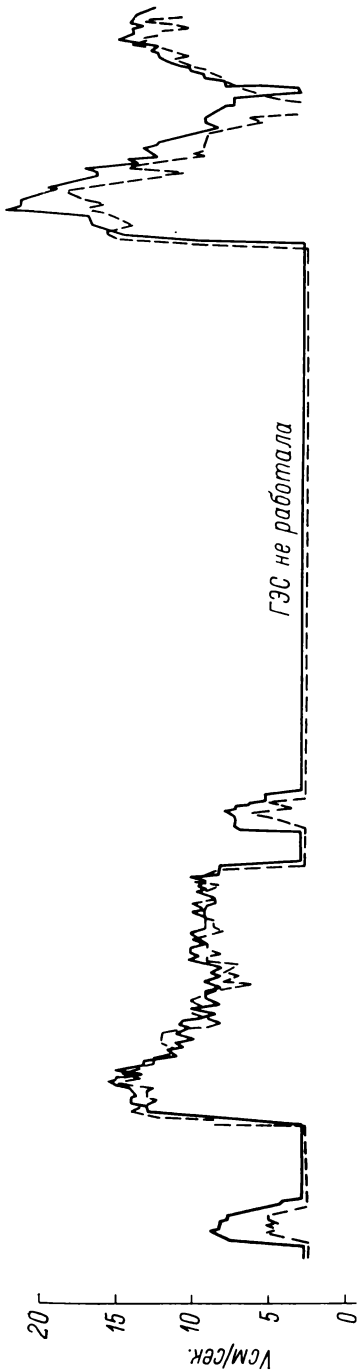
Рис. 10. Вертикальное распределение относительных скоростей (по отношению к средней на вертикали) течения на стреевых вертикалях гидростворов I—III 16 IV 1963.

1 — за 11 час.; 2 — за 12 час.; 3 — за 13 час.; 4 — за 14 час.

начинают убывать раньше, чем на горизонте 0.2 м, абсолютная величина скорости в поверхностных слоях может быть значительно выше, чем в придонных.

Таким образом, придонный слой в створе Коприна быстрее реагирует на изменения в режиме сбросов, чем поверхностный. Более наглядно это выражается в изменении направления течения, где сдвиг во времени достигает 40—90 мин. (рис. 11).

При обратном направлении течения (т. е. при прохождении в створе обратной положительной волны) время появления заметных скоростей на горизонтах 0.2 и 0.8 м примерно одно и то же, но абсолютная величина скорости в поверхностном слое как в период интенсивного изменения, так и при максимальных скоростях значительно выше. Кроме того, интересно также отметить тот факт, что в период воскресного провала в работе ГЭС, когда скорости течения в створе с. Коприно стано-



вятся ниже чувствительности самописцев и перемещение вод улавливается только по изменению направления течения, на горизонте 0.8 м устойчивость в направлении течения больше, чем на горизонте 0.2 м.

Существующие в настоящее время в литературе материалы по изучению скоростного поля потока в головной части волны попуска весьма противоречивы. Хотя представленные в настоящей работе данные и согласуются с лабораторными исследованиями структуры скоростного поля, выполненными Г. Ф. Федоровым (1960), необходимо отметить, что лабораторные исследования А. Н. Шабрина (1964) и натурные наблюдения Государственного гидрологического института на р. Тверце (Федоров, 1965) дают противоположные результаты, т. е. эти авторы приходят к выводу, что при прохождении головной части волны попуска эпюра распределения скоростей не претерпевает существенных изменений. Н. Н. Федоров указывает, что перестройка эпюры скоростей происходит лишь тогда, когда средние скорости принимают практически постоянное значение. В ходе этой перестройки отношение поверхностной и придонной скорости и средней на вертикали может отклоняться до 20—25%, что также согласуется с нашими материалами.

В табл. 5 представлены результаты вычислений расходов воды по материалам наблюдений в створах Мышкина, Юрьина и Коприна. Выше уже отмечалось, что измерения проводились при режиме сбросных расходов через ГЭС, близком к установившемуся. За период измерений последние увеличились с 11 до 12 час. всего на 20 м³/сек., что при первоначальном сбросе 844 м³/сек. составляет 2.5%.

Из таблицы видно, что в створах Мышкина и Коприна измеренный расход воды в начале на-

Таблица 5

Данные определения расходов воды 16 IV 1963 при среднем уровне по плесу ниже НПУ на 3.51 м

Показатели	часы														Борок — Коприно	
	Угличская ГЭС							Мышкино							Юрьино	
	11	12	13	14	11	12	13	14	11	12	13	14	11	12	13	14
H , м. усл.	8.73	8.75	8.73	8.75	8.53	8.53	8.54	8.54	8.49	8.49	8.49	8.50	8.44	8.44	8.44	8.44
Q , м³/сек.	844	864	864	864	927	945	970	1002	1048	1090	1140	1160	927	1011	1028	1042
F м. пр., м²	—	—	—	—	—	185	185	185	425	425	425	425	1578	1578	1578	1578
F п. лед, м²	—	—	—	—	—	3005	3005	3005	5130	5130	5130	5130	8926	8926	8926	8926
F ж. с., м²	—	—	—	—	—	3190	3190	3190	5555	5555	5555	5555	10614	10614	10614	10614
F общ., м²	—	—	—	—	—	0.31	0.32	0.33	0.20	0.21	0.22	0.23	0.10	0.11	0.12	0.12
V ср., м/сек.	—	—	—	—	—	0.43	0.43	0.44	0.26	0.27	0.29	0.29	0.16	0.18	0.19	0.18
V наиб., м/сек.	—	—	—	—	—	405	405	405	680	680	680	680	2150	2150	2150	2150
B , м.	—	—	—	—	—	7.9	7.9	7.9	8.2	8.2	8.2	8.2	4.94	4.94	4.94	4.94
H ср. м.	—	—	—	—	—	13.0	13.0	13.0	11.8	11.8	11.8	11.8	12.7	12.7	12.7	12.7
H наиб., м	—	—	—	—	—	13.0	13.0	13.0	11.8	11.8	11.8	11.8	12.7	12.7	12.7	12.7

блюдений превышал таковой в створе ГЭС на 10%, а к концу наблюдений эта разность увеличилась до 22%. В створе же Юрьина увеличение расхода составляло соответственно 22 и 34% по отношению к расходу в створе ГЭС. Наиболее вероятно, что увеличение расходов в створах Мышкина и Коприна происходило за счет боковой приточности. Несколько более высокие расходы в створе Юрьина могли быть связаны с наличием местного подпора, вызванного искусственным сужением русла, которое уменьшало площадь водного сечения приблизительно на 30%.

В заключение остановимся на водообмене Волжского плеса Рыбинского водохранилища. Так как среднегодовой объем стока через Угличский гидроузел равен 13.5 км^3 , причем из них 6.3 км^3 приходится на весенний период, то в течение 10 месяцев среднемесячный объем стока составляет около 0.7 км^3 . Объем же Волжского плеса при уровне на 2 м ниже НПУ равен 1.7 км^3 . Отсюда следует, что в течение 10 месяцев объем Волжского плеса полностью сменяется за 2.4 месяца. В весенний же период (с 20 IV по 20 VI), когда среднемесячный объем стока увеличивается до 3.1 км^3 , смена водной массы в плесе происходит приблизительно за 16—17 дней.

Заключение

1. В Волжском плесе Рыбинского водохранилища наблюдаются сезонные, недельные и суточные колебания уровня. Сезонные колебания связаны с изменением среднего уровня водохранилища и отражают характер соотношения притока и сброса вод за длительный промежуток времени. Недельные и суточные колебания уровня обусловлены режимом сработки вод через Угличский гидроузел. Недельные колебания связаны с периодическими провалами в работе ГЭС в выходные и предпраздничные дни, а суточные вызываются прохождением волн попусков в результате суточного регулирования сброса воды через ГЭС.

2. Постоянные уклоны водной поверхности в Волжском плесе в зимний период отсутствуют, однако в результате прохождения волн попусков создаются периодические перекосы водной поверхности. Причем при прохождении положительных волн (волн повышения) возникают положительные уклоны, а при прохождении отрицательных волн — отрицательные. Абсолютная величина уклонов зависит от уровня водохранилища и в 10 раз меньше бытового уклона Волги.

3. Режим течений определяется режимом сработки вод через Угличский гидроузел и изменяется в течение года. Абсолютная величина скорости зависит от расхода воды через ГЭС, уровня Рыбинского водохранилища и объема пуска.

4. В период интенсивного увеличения скоростей (при прохождении прямой положительной волны) наблюдается значительное превышение абсолютной величины придонных скоростей по сравнению с поверхностными, а в период резкого уменьшения скорости абсолютная величина скорости в поверхностном слое может быть значительно выше, чем в придонном.

ЛИТЕРАТУРА

- Архангельский В. А. 1947. Расчеты неустановившегося движения в открытых водотоках. Изд. АН СССР, М.—Л.
- Балагуров М. 1957. Опыт эксплуатации Волжского каскада. Матер. н.-техн. совещ. по работе гидроэлектростанций в каскаде. Тез. докл., вып. 1, Запорожье.
- Буторин Н. В. и К. К. Эдельштейн. 1961. Опыт применения электрофилярной вертушки (ЭБВ-7) для изучения течений Рыбинского водохранилища. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 11.
- Буторин Н. В. и А. С. Литвинов. 1963. О течениях в Рыбинском водохранилище. В сб.: Биологические аспекты изучения водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 6.

- Б у т о р и н Н. В. и К. А. Б а к у л и н. 1963. Структура скоростного поля зимнего потока на разрезе Борок—Коприно. В сб.: Биологические аспекты изучения водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 6.
- Г а в р и л о в А. М. 1963. Учет стока на крупных ГЭС в свете новых данных последних лет. Матер. I н.-техн. совещ. по изучению Куйбышевского водохр., вып. 1.
- Г р у ш е в с к и й М. С. 1962. Использование электронной цифровой машины для расчета неустановившегося движения воды в призматическом русле. Тр. ГГИ, вып. 94.
- Г р у ш е в с к и й М. С. 1965. Некоторые вопросы неустановившегося движения воды в естественных руслах и водоемах. Тр. ГГИ вып. 121.
- Е г и а з а р о в И. В. 1937. Неустановившееся движение в длинных бьефах. Изв. ВНИИГ, т. 21.
- Л и т в и н о в А. С. 1967. О распространении волн попусков в нижнем бьефе Угличской ГЭС. Информац. бюлл. «Биология внутренних вод», № 2.
- Ф е д о р о в Г. Ф. 1960. Изучение кинематики волны пуска. Тр. ЦНИИЭВТ, вып. XIX В сб.: Речной транспорт.
- Ф е д о р о в Н. Н. 1965. Влияние неустановившегося движения воды на распределение осредненных скоростей по вертикали. Тр. ГГИ, вып. 121.
- Ш а б р и н А. Н. 1964. Исследование скоростной структуры и характеристик турбулентности плоского нестационарного потока. Автореф. канд. дисс. Изд. Инст. гидромеханики АН УССР, Киев.
-

В. Ф. Рощупко

МАТЕРИАЛЫ ПО ЦВЕТНОСТИ И ХИМИЧЕСКОМУ СОСТАВУ ВОД ВЕРХНЕВОЛЖСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Воды верховьев Волги играют основную роль в водоснабжении Москвы, а повышенные цветность и окисляемость представляют собой важнейший недостаток волжской воды с точки зрения ее питьевых качеств (Озеров, 1927). Поэтому изучение окрашенности и химического состава воды имеет и практическое значение.

В экспедиционных рейсах, организованных Институтом биологии внутренних вод АН СССР в 1964—1966 гг., окрашенность вод верховьев Волги и Верхневолжского водохранилища изучалась одновременно с другими химическими и физическими ее характеристиками: температурой, прозрачностью, электропроводностью, перманганатной окисляемостью, суммарным содержанием железа, содержанием гидрокарбонатов, кальция, магния, а в отдельных пробах — натрия и калия.

Для определения окрашенности воды была использована хромово-кобальтовая шкала, цветовой тон воды определялся по шкале Фореля—Уле. Общее содержание солей — по удельной электропроводности на реохордном мостике Р-38. Определение других компонентов проводилось общепринятыми методами (Алекин, 1954). Химизму вод этого района посвящено немного исследований (Озеров, 1927; Абросов, 1961). В настоящей работе, кроме собственных наблюдений, использовались данные Гидрометеослужбы Центральных областей.

Бассейн верховьев Волги — сложный озерно-речной район. Большое количество котловин, западин, маленьких озер и наличие значительных лесных массивов, регулирующих поверхностный сток, замедляют развитие эрозионных процессов, а повышенная влажность ведет к заболачиванию больших площадей. Преобладание снегового питания, составляющего 50% (Загорский, 1960), хорошая промытость песчаных и супесчаных почв обуславливают бедность вод минеральными солями, а широкое распространение болот и большая залесенность района повышают содержание окрашенного органического вещества и поддерживают высокую окисляемость воды.

Вода истока Волги болотного происхождения и характеризуется слабокислой реакцией, высокой цветностью и окисляемостью, малым содержанием растворенных солей. Цветность воды истока, судя по единичным наблюдениям, сделанным в мае, июле, августе и сентябре 1950, 1964—1966 гг., колеблется в широких пределах. В июле дождливого 1950 г. В. Н. Абросовым (1961) определена цветность 488°, а в сухое лето 1966 г. — 240° (наши данные). Перманганатная окисляемость вод истока порядка 50—60 мг O_2 /л. Удельная электропроводность невелика (40—65 мксим./см), суммарное содержание железа 0.6—0.74 мг/л, а общая жесткость не превышает 0.77 мг-экв./л $Ca^{++} + Mg^{++}$.

При впадении в оз. Малый Верхит (примерно в 1.5—2 км от истока) цветность воды ручья Волга уменьшается в 2.5—4 раза. В Малом Верхите в период наших наблюдений цветность воды колебалась от 90 до 170°. Более чем в 2 раза уменьшается и окисляемость, значения которой в этом озере не превышают 20—25 мг O_2 /л. Суммарное содержание железа уменьшается в зависимости от сезона и водности года.

Цветность воды в оз. Большой Верхит летом и осенью на 20—30° выше, чем в Малом. Это объясняется поступлением интенсивно окрашенных вод из болот, расположенных ниже последнего.

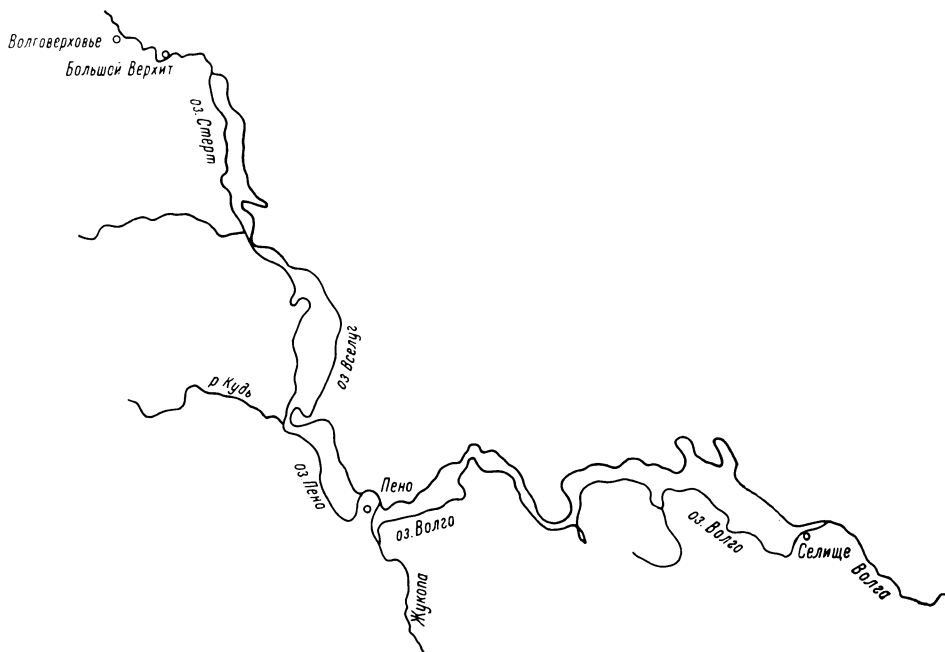


Схема верховьев Волги и Верхневолжского водохранилища.

Отдельные наблюдения показали колебание окрашенности воды в июле—августе 1964, 1966 гг. от 100 до 120°.

Верхневолжское водохранилище — своеобразный водоем, включающий четыре зарегулированных озера (см. рисунок): Стерж, Вселуг, Пено и Волго. Площадь зеркала водохранилища при нормальном наполнении достигает 181 км², а объем 805.1 млн м³. До проведения канала им. Москвы и создания Волжского каскада накопление воды в Верхневолжском водохранилище проводилось с целью обеспечения гарантийных глубин для судоходства в верхнем плесе Волги вплоть до Рыбинска. В настоящее время сброс воды производится для увеличения расходов воды в канале им. Москвы. Сброс воды через бейшлот производится 2 раза в год: весной — в мае и июне, осенью — в сентябре—октябре. Ежегодный сброс воды из Верхневолжского водохранилища в среднем составляет 866 млн м³.

Оз. Стерж, самый верхний по течению Волги плес водохранилища, в наименьшей степени испытывает влияние подпора. Воды оз. Стерж довольно однородны по своим гидрохимическим показателям в течение всего безледного периода. По сравнению с истоком Волги в них увеличивается электропроводность, которая достигает 110—130 мксим./см.

жесткость возрастает до 1.3—1.5 мг-экв./л $\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}$. Объем вод ручья Волги в данном случае меньше объема вод других многочисленных притоков, питающих озеро. Цветность воды изменяется в течение года в широких пределах. В зависимости от сезона и водности года значения ее меняются от 22 до 124°. В июле и сентябре цветные воды истока Волги существенного влияния на окрашенность вод оз. Стерж не оказывают. Так, при впадении Волги в Стерж была определена в июле цветность, равная 60°. Цветовой тон воды озера в течение года колеблется в пределах XVI—XXI шкалы Фореля—Уле.

В протоку между озерами Стерж и Вселуг впадает р. Руна, длиной 28 км, несущая воды бассейнов озер Хвошня и Истошня. В половодье она приносит больше воды, чем все вместе взятые речки и ручьи, впадающие в оз. Стерж, включая и речку, условно принимаемую за исток Волги. Руна нередко вызывает противотечение в сторону оз. Стерж. Годовой сток Руны в период 1897—1898 гг. составлял 116.2 млн м³ (Бушмакин, 1904). Протекая по лесной болотистой местности и принимая около 30 притоков общей длиной 73 км, Руна несет темноокрашенные воды, цветность которых обычно превышает 100° и повышает цветность вод в верхней части оз. Вселуг на 15—20°.

Второй расширенный плес Верхневолжского водохранилища — оз. Вселуг. На севере оно соединяется узкой протокой с оз. Стерж, а в южной части — с расположенным ниже оз. Пено. Вода оз. Вселуг по своим показателям мало отличается от воды оз. Стерж. По данным Рыбинской гидрометеорологической обсерватории, прозрачность уменьшается от зимы к лету, падая до минимума во время массового развития фитопланктона. Цветность тоже уменьшается от весенне-летнего периода к зиме, изменяясь в пределах 96—21°. Цветовой тон воды зимой соответствует XVI, как и в оз. Стерж в этот период. В ионном составе преобладают гидрокарбонаты и кальций. К осени в воде озера возрастает относительное содержание ионов сильных кислот за счет HCO_3^- .

Оз. Пено — третье в системе Верхневолжского водохранилища. В верхней части оз. Пено отделяется от плеса оз. Вселуг дамбой, перекрывающей пойму р. Кудь немного выше места ее впадения в озеро. Длина плеса 9.0 км, площадь зеркала при нормальном наполнении 21.2 км², средняя глубина 4.2, наибольшая 8.4 м.

Прозрачность воды в плесе оз. Пено колеблется летом от 0.5 до 2.2 м (табл. 1), зимой достигает наибольших величин. Цветовой тон в летние месяцы колеблется в пределах XVIII—XIX, зимой соответствует XVI.

Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что сезонные изменения окрашенности воды сильно различаются в отдельные годы. Показатели окрашенности в зимние месяцы определяются преимущественно гидрометеорологической обстановкой в конце осени предшествовавшего года, т. е. в тот период, когда в водохранилище аккумулируется вода при закрытом бейшлоте. Активная реакция воды в оз. Пено — преимущественно нейтральная или слабощелочная. Повышение pH до 8.2 происходит во время интенсивного развития синезеленых водорослей в конце лета и в начале осени. Содержание гидрокарбонатного иона в зимние месяцы колеблется в пределах 73—95 мг/л (табл. 2), весной оно уменьшается до 58 мг/л. В июле—августе содержание гидрокарбонатного иона снова повышается, достигая в отдельных пробах более 80 мг/л. Среди катионов первое место принадлежит кальцию, содержание которого варьирует от 21 до 26 мг/л зимой, 17—19 летом, 16—24 мг/л осенью, т. е. в пределах, типичных для изучаемого района.

В верхнюю часть озера с запада впадает р. Кудь, в верховье которой сооружено водохранилище с целью поддержания лесосплава по реке в межженный период. Годовой сток Куди в 1897—1898 гг. составил 140.8 млн м³

Т а б л и ц а 1

Физические и химические характеристики вод оз. Пено

Сезон, дата	Место отбора проб	Прозрач- ность, м	Цветность, град.	pH	Удельная электропро- водность, мксим./см	Общее же- лезо мг Fe/л	Окислие- мость (пер- ман.) мг O ₂ /л	Источник данных	
Весна									
20 V 1950	Волжская протока Середина расширен- ной части	2.0	48	7.6	—	—	—	Абросов	
23 V 1965		—	100	—	—	—	18.6	Фотиев	
Лето									
4 VIII 1950	Волжская протока	—	66	—	—	—	—	Абросов	
6 VII 1961	Изведово »	—	51	7.40	—	0.22	15.6	} Пост ГМС	
29 VIII 1963		—	34	7.40	—	0.36	11.7		
20 VIII 1964	» »	1.0	40	7.60	—	—	—	Чиркова Пост ГМС	
30 VII 1964		—	31	7.80	—	0.05	12.6		
16 VII 1965	ст. 23	2.0	55	< 7.59	100.0	0.36	11.0	} Наши данные	
18 VII 1966	ст. 18-а	2.2	35		8.20	97.9	—		10.9
23 VII 1966	ст. 22	0.8	60		7.17	110.6	—		14.0
	ст. 21	1.5	40		8.20	95.1	—		10.6
	ст. 20	0.5	55		7.60	108.9	—		13.2
	ст. 23	1.3	45		7.60	99.3	—		11.5
Осень									
9 IX 1962	Изведово »	—	76	7.20	—	0.22	15.1	} Пост ГМС	
22 X 1964		—	32	7.60	—	0.42	10.5		
15 IX 1965	Ст. 23	1.5	40	8.20	120.0	0.17	8.1	Наши данные Пост ГМС	
17 XI 1965	Изведово	1.0	48	7.60	—	0.28	11.9		
Зима									
28 III 1950	Волжская протока	1.5	80	—	—	—	—	Абросов	
20 III 1961	Изведово » » » »	—	118	6.65	—	0.30	24.0	} Пост ГМС	
19 III 1962		—	53	7.20	—	0.42	13.0		
26 III 1963		—	80	7.00	—	0.32	22.8		
11 III 1964		—	40	7.40	—	0.14	10.1		
12 III 1965		1.9	24	7.15	—	0.20	8.2		
10 III 1966	пос. Пено: глубина 0.5 м глубина 2.2 м	2.4 —	XVI XVI	7.00 6.80	— —	— —	— —	} Рыбин- ская ГМО	

П р и м е ч а н и е. Римскими цифрами обозначен цветовой тон по шкале Фореля—Уле.

Таблица 2 (продолжение)

Сезон, дата	Место отбора проб	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ [']	SO ₄ ^{''}	Cl [']	Сумма ионов	Источник данных
26 VII 1965	Изведово	23.4 1.17 41.8	2.80 0.23 8.2	— — —	70.8 4.16 41.7	7.20 0.15 5.4	2.90 0.08 2.9	— 1.39 —	Пост ГМС
3 VIII 1965	»	23.0 1.14 40.8	2.70 0.22 7.6	2.10 0.08 2.4	72.6 4.19 41.3	7.90 0.16 5.6	3.10 0.09 3.1	111.4 1.44 —	
18 VII 1966	ст. 18-а	20.3 1.01 35.5	3.8 0.31 11.0	1.08 0.03 3.5	70.8 4.16 40.8	19.6 0.20 7.0	2.20 0.06 2.2	119.5 1.42 —	
23 VII 1966	ст. 22	22.8 1.14 35.0	4.90 0.40 12.1	0.78 0.02 2.9	83.6 4.37 41.5	10.6 0.22 6.7	2.10 0.06 1.8	126.9 1.65 —	Наши данные
23 VII 1966	ст. 21	21.2 1.06 32.0	5.80 0.48 14.5	1.05 0.03 3.5	73.8 4.21 36.5	18.7 0.39 11.7	2.10 0.06 1.8	124.7 1.66 —	
23 VII 1966	Ст. 20	23.8 1.19 38.4	3.20 0.26 8.4	0.76 0.02 3.2	83.6 4.37 44.2	5.8 0.12 3.8	2.10 0.06 2.0	121.1 1.55 —	Наши данные
23 VII 1966	ст. 23	20.6 1.03 35.3	3.80 0.31 10.3	1.12 0.03 4.4	72.0 4.18 40.5	10.6 0.22 7.0	2.20 0.06 2.5	112.3 1.46 —	
Осень									
9 IX 1962	Изведово	— — —	— — —	— — —	61.0 1.00 43.2	4.90 0.10 4.40	2.00 0.06 2.4	— 1.16**** —	Пост ГМС
18 IX 1965	ст. 23	22.0 1.10 38.0	2.88 0.24 8.0	0.90 0.02 4.0	70.2 4.15 39.0	— 0.29 11.0	— 0.29*** 11.0	— 1.44 —	

Т а б л и ц а 2 (продолжение)

Сезон, дата	Место отбора проб	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺ + K ⁺	HCO ₃ [']	SO ₄ ^{''}	Cl [']	Сумма ионов	Источник данных
17 XI 1965	Изведово	—	—	—	84.2 1.33 42.6	6.90 0.14 4.50	3.20 0.09 2.90	— 1.56**** —	} Пост ГМС
Зима									
28 III 1950	Воляжская протока	25.1 1.28 33.9	4.00 0.33 8.7	7.00 0.28 7.4	93.4 1.53 40.7	15.2 0.32 8.5	1.10 0.03 0.8	145.8 1.89 —	} Абросов
20 III 1961	Изведово	13.1 0.65 30.1	3.20 0.26 11.4	4.70 0.17 8.5	36.0 0.59 27.0	18.4 0.39 18.0	3.90 0.10 5.0	79.3 1.08 —	
19 III 1962	»	22.7 1.13 33.6	4.30 0.35 10.6	5.36 0.20 5.8	90.3 1.48 44.2	7.00 0.15 4.4	1.70 0.05 1.4	131.4 1.68 —	} Пост ГМС
26 III 1963	»	21.4 1.07 38.3	3.30 0.27 9.8	1.07 0.04 1.9	73.2 1.20 43.8	4.90 0.10 3.8	2.90 0.08 2.9	106.8 1.38 —	
11 III 1964		23.0 1.15 33.8	5.00 0.41 12.1	3.22 0.12 4.10	87.8 1.44 4.29	7.30 0.15 4.40	3.20 0.09 2.70	129.5 1.68 —	} Пост ГМС
12 III 1965	Изведово	25.8 1.29 36.6	4.6 0.38 10.8	2.41 0.09 2.6	95.2 1.56 44.3	7.00 0.15 4.3	1.90 0.05 1.4	137.0 1.76 —	

Пр и м е ч а н и е. Для каждой пробы: 1-я строка — мг/л; 2-я строка — мг-экв./л; 3-я строка — ‰ экв.

* Na⁺ и K⁺ вычислены по разности.

** Определения Na⁺ и K⁺ произведены на планшетном фотометре.

*** SO₄^{''} и SO₄^{''}+Cl['] вычислены по разности.

**** Анализ не балансируется.

(Бушмакин, 1904). Вода Куди бедна растворенными солями, цветность ее изменяется в пределах $45-80^{\circ}$ (в июле, сентябре). Р. Ореховня, впадающая с запада в один из заливов озера, в период половодья оказывает существенное влияние на окрашенность юго-западной части плеса оз. Пено.

Прозрачность воды на участке Верхневолжского водохранилища между плесами Пено и Волго летом изменяется в пределах $0.8-1.0$ м, к зиме увеличивается. Цветность воды, по нашим наблюдениям, в этом районе была того же порядка, что и в верхних плесах. Осенью более высокие величины цветности были отмечены ниже впадения р. Жукопы.

Ниже пос. Пено в водохранилище с юга впадает р. Жукопа, половодье на которой начинается немного раньше, чем в бассейне северных плесов водохранилища, и сток воды превышает суммарный объем стока рек, впадающих в водохранилище выше пос. Пено. Годовой сток Жукопы равен 380.3 м^3 (Атлас Калининской области, 1964). Протекая по лесной, местами заболоченной местности, р. Жукопа вносит в водохранилище более окрашенную воду, чем Кудь и Руна. Она несет большое количество раздробленной древесной коры, которая служит не только существенным компонентом донных отложений, но, возможно, и фактором, повышающим цветность и окисляемость воды водохранилища. Величины цветности воды Жукопы в мае, июле, сентябре велики ($150-225^{\circ}$). Количество минеральных веществ выше, чем в Руне и Куди.

Уровень, глубина и площадь зеркала плеса оз. Волго — нижнего в системе Верхневолжского водохранилища — колеблются в более широких пределах, чем в верхних плесах. По наблюдениям, сделанным летом, наибольшая прозрачность (1.3 м) была найдена в глубокой расширенной части плеса. В начале осени прозрачность увеличивается, достигая наибольших величин зимой. Степень окрашенности воды плеса оз. Волго в течение года колеблется в пределах $21-156^{\circ}$. Резкое снижение окрашенности и окисляемости зимой при одновременном увеличении общего содержания ионов свидетельствует о повышении роли грунтового питания. Показатели окрашенности, достигающие 150° и выше, были отмечены В. Н. Абросовым (1961) в мае и августе многоводного для верховьев Волги 1950 г. В июле и августе 1965—1966 гг. цветность воды оз. Волго изменялась в пределах $50-90^{\circ}$.

Перманганатная окисляемость воды оз. Волго колеблется в пределах $9-23 \text{ мг O}_2/\text{л}$. Активная реакция воды в течение большей части года близка к нейтральной. Наиболее высокие показатели рН $7.9-8.4$ характерны для летних месяцев и начала осени.

Количество растворенных в воде минеральных компонентов невелико. По сравнению с вышележащими плесами вода оз. Волго даже в июле содержит меньше растворенных солей, что объясняется более значительным разбавлением зимних вод водами половодья. Содержание солей увеличивается осенью и зимой.

Реки, впадающие в оз. Волго, несут более цветные и более богатые растворенными солями воды, чем вода самого озера.

Заключение

Окрашенность вод верховьев Волги, как правило, выше средней, а местами высокая. Согласно классификации окрашенности вод, предложенной М. А. Фортунатовым (1959), в Верхневолжском водохранилище преобладают воды среднеокрашенные и повышенной окрашенности. Вод, почти лишенных окраски, ни в водохранилище, ни в протекающих в бассейне верховьев Волги реках обнаружено не было. Интенсивно и темноокрашенные воды в открытых плесах водохранилища встре-

чаются, преимущественно в годы с большим стоком, во вторую фазу половодья или в годы с большим количеством летних осадков. Очень темноокрашенные воды и исключительно темноокрашенные, цветность которых выше 150° , встречаются в ручьях и реках, вытекающих из болот. Болото, из которого вытекает ручей, условно называемый истоком Волги, характеризуется очень высокой окрашенностью воды (от 200 до 488°). При сравнении верхних и нижних плесов видно, что вода озер Стерж, Вселуг, Пено менее окрашена, чем расположенного ниже плеса оз. Волго. Это связано с большим объемом стока цветных вод р. Жукопы по сравнению с другими притоками, впадающими в водохранилище выше пос. Пено.

Высокие показатели цветности воды Верхневолжского водохранилища обуславливаются присутствием органического вещества, вносимого реками и ручьями, что подтверждается их высокой перманганатной окисляемостью. Влияние солей железа на величину цветности незначительно, поскольку общее содержание железа не превышает 1 мг/л .

Количество растворенных солей увеличивается от истока к бейшлоту. Притоки вносят в водохранилище воды, более богатые растворенными солями, чем вода озер. В самом водохранилище и в его притоках вода должна быть отнесена к гидрокарбонатному классу, кальциевой группе (Алекин, 1954).

ЛИТЕРАТУРА

- А б р о с о в В. Н. 1961. Основные региональные черты озер истоков Волги, Западной Двины, Ловати и Великой. Малые водоемы равнинных областей СССР и их использование. Изд. АН СССР, М.—Л.
- А л е к и н О. А. 1953. Основы гидрохимии. Гидрометеиздат, Л.
- А л е к и н О. А. 1954. Химический анализ вод суши. Гидрометеиздат, Л.
- А т л а с К а л и н и н с к о й о б л а с т и. 1964. ГУГК ГГК СССР, М.
- Б у ш м а к и н И. В. 1904. Исследования для устройства дополнительного водоснабжения Верхней Волги. Отчет, чч. 2, 3, СПб.
- З а г о р с к и й Г. Ф. 1960. Реки Калининской области. Природа и хозяйство Калининской области. Уч. зап. Калининск. пед. инст.
- О з е р о в С. А. 1927. Волга, Ока и Москва-река как источники водоснабжения Москвы. Тр. ком. по изыскан. новых источников водоснабж. г. Москвы, вып. 4, М.
- 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.

СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ДНА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Изучению термического режима Рыбинского водохранилища посвящен ряд работ, и в настоящее время основные его закономерности при открытом русле хорошо известны (Тачалов, 1959; Рутковский, 1963). Менее освещен температурный режим во время замерзания, ледостава и вскрытия водохранилища. Разделы работ, посвященные этим периодам, основаны на малом фактическом материале и носят в основном описательный характер.

Особенно слабо по сравнению с водной толщей изучен температурный режим дна водоемов и прилегающих к нему микрослоев воды, что объясняется прежде всего отсутствием приборов, позволяющих произвести соответствующие наблюдения. Внедрение в практику исследований электротермометров с малогабаритными датчиками позволило приступить к изучению термического режима этой интересной во многих отношениях части водоема. Как известно, через дно водоема, являющегося границей раздела твердой и жидкой сред, происходит теплообмен между водной массой и грунтом. Температурный режим поверхности дна как пограничного слоя вода—грунт в водоеме отражает одновременно термику придонного слоя воды и термику верхнего слоя грунта, а температурный режим последних оказывает большое влияние на жизнедеятельность придонных организмов.

Предлагаемая работа посвящена температурному режиму дна Рыбинского водохранилища. В ней используются данные о температуре, полученные в синхронных съемках, произведенных в 1960—1964 гг. (Буторин, 1965).

Синхронные съемки в навигационный период производились в течение дня одновременно с 4 судов, в зимнее время — с гусеничной машины ГАЗ-47 за несколько дней. За год производилось 6—8 съемок, охватывающих наблюдениями все сезоны года. Местоположение станции всех съемок было постоянным (рис. 1), а их количество изменялось в зависимости от сложности навигационной и термической обстановки. В навигационный период наблюдения производились на 55—60 станциях, при сложной термической обстановке количество их увеличивалось до 67—69, а зимой для уменьшения сроков съемки количество станций сокращалось до 25—40. Температура измерялась термометром с полупроводниковым датчиком (Бакастов, 1965), причем при измерении температуры дна малогабаритный и малоинерционный датчик помещался непосредственно на поверхность грунта.

При делении года на сезоны принята схема, предложенная Н. В. Буториным и Т. Н. Курдиной (1965). Она разработана для Рыбинского водохранилища и основана на анализе гидрологического режима, в первую очередь уровня и термического. По принятой схеме гидрологи-

ческая весна продолжается три месяца (IV—VI), лето — 2 месяца (VII—VIII), осень — 2 месяца (IX—X) и самый продолжительный се-

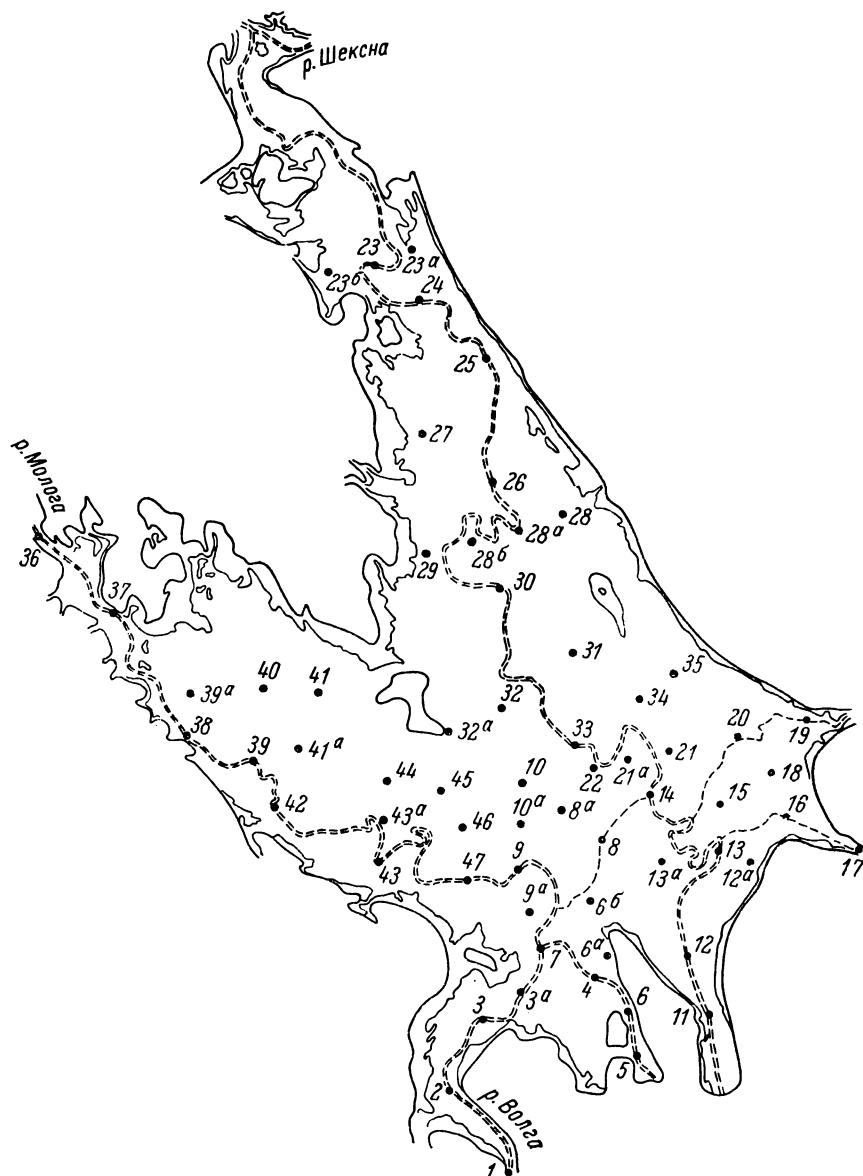


Рис. 1. Схема Рыбинского водохранилища со станциями синхронной съемки.

зон — гидрологическая зима — 5 месяцев (XI—III). По развитию гидрометеорологических процессов в водохранилище целесообразно начать рассмотрение донных температур с весны.

ВЕСЕННИЙ СЕЗОН (IV—VI)

Весенний период характеризуется на Рыбинском водохранилище резким повышением уровня, увеличением объема и площади, интенсивным накоплением тепла в его водной толще, большим различием в темпера-

туре и минерализации зимних и поступающих в водохранилище вод речного половодья.

Донные температуры весной формируются в основном под влиянием двух факторов: солнечной радиации и воздействия поступающих в водохранилище вод половодья. Первый прогрев дна весной начинается после очищения льда от снега еще задолго до схода ледяного покрова под воздействием солнечной радиации. Прогрев грунта в этом случае происходит не только под непосредственным влиянием солнечных лучей, проникающих на глубину, равную величине прозрачности воды в это время, т. е. на 1—2 м, но и на более глубоких местах (до 4—5 м) за счет конвективной передачи тепла грунту от прогретых солнечной радиацией верхних слоев воды. Температура поверхности грунта в результате подледного прогрева на мелководных участках повышается от 0—1 до 3—4°. Подледный прогрев грунта, хотя и наблюдается повсеместно и ежегодно, продолжается недолго и выражен неярко, так как освобождение льда от снежного покрова (обычно середина апреля) совпадает с началом действия другого мощного температурообразующего фактора — поступления в водохранилище талых вод с иной температурой.

Весеннее наполнение Рыбинского водохранилища талыми водами начинается задолго до разрушения ледяного покрова, и часто от 1/3 до 1/2 объема половодья поступает при сплошном или почти сплошном ледяном покрове на большей его части (первая фаза половодья) и заканчивается после схода ледяного покрова (вторая фаза половодья). Воды первой и второй части половодья сильно отличаются по температуре и по характеру их воздействия на температуру дна водохранилища.

Воды притоков и склонового стока первой фазы половодья имеют низкую температуру, от 0 до нескольких десятых градуса. Поступление их выхолаживает поверхность дна на участках, где дно начало прогреваться в результате проникновения через лед солнечной радиации, и на участках Моложского и Шекснинского плесов с повышенной в результате зимнего прогрева температурой дна. Тающий в водохранилище лед также задерживает весенний прогрев поверхности дна.

Основным источником тепла, оказывающим весной решающее влияние на повышение температуры дна водохранилища, является тепло вод притоков, поступающих во второй половине весеннего периода (май). Водохранилище к этому времени очищается от льда, но поверхность дна центральных его частей имеет еще температуру, близкую по значению к зимней (2—4°), а температура дна Моложского, Шекснинского и Волжского плесов резко повышается под влиянием уже значительно прогретых (до 8—12°) вод половодья больших притоков. На границах речных плесов в это время образуются участки с большими горизонтальными градиентами температуры дна в зонах соприкосновения вод половодья с остатками зимних водных масс. Характерное для этого периода распределение донных температур приводится по данным съемки 9 V 1960 (рис. 2, а). На схеме отчетливо выражены пограничные зоны с большими горизонтальными градиентами температуры между речными плесами с дном, прогретым до 8—10°, и центральной частью с донными температурами 2—4°.

На рис. 3, а показан продольный температурный разрез по Шекснинскому плесу от ст. 23 к центру водохранилища по данным той же съемки. Расположение изотерм на разрезе показывает, что теплая водная масса второй фазы половодья движется к центру водохранилища в условиях полной гомотермии, поверхностные температуры отличаются от донных не более чем на 0.1°.

Вертикальная однородность вод половодья в периоды их интенсивного поступления характерна для Рыбинского водохранилища и наблюдалась

неоднократно (Ершова, 1962; Рутковский, 1963). Аналогичное явление вертикальной однородности в весенних речных водах во время их интенсивного перемещения в глубь водоема, когда отсутствует явление подтекания или натекания весенних вод на зимние, наблюдала М. Г. Ершова на Череповецком водохранилище.

В конце весеннего периода поступление солнечного тепла увеличивается, и при наличии тихой погоды происходит резкое увеличение горизонтальных и вертикальных градиентов температуры. Картограмма донных температур для периода с большим термическим расслоением

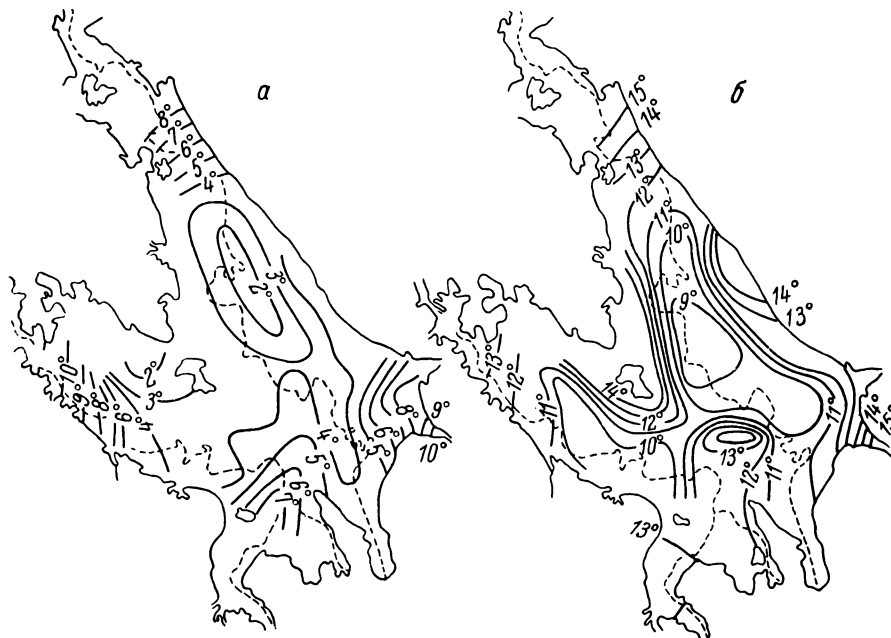


Рис. 2. Схема Рыбинского водохранилища с изотермами дна.

а — 9 V; б — 3 VI 1960.

водных масс водохранилища 3 VI 1960 приводится на рис. 2, б. На схеме выделяются прогретые до $14\text{--}16^\circ$ участки дна водохранилища, преимущественно вдоль берегов. В глубоководных центральных участках и по руслам затопленных рек температура дна держится около $8\text{--}9^\circ$. Изотермы дна в большей части водохранилища направлены вдоль берегов и склонов, что отражает разную степень прогретости дна в зависимости от глубины.

В Волжском, Моложском и Шекснинском плесах температура дна по мере удаления от центра водохранилища повышается до $14\text{--}15^\circ$. Направление донных изотерм здесь отличается от направления их в центральных частях водохранилища. Они расположены не вдоль берегов и склонов, а поперек затопленного русла и долины. Такое странное на первый взгляд направление изотерм и более высокую температуру дна в удаленных от центра частях плесов можно объяснить тем, что водные массы здесь перемещаются под влиянием стоковых течений, при этом температура по вертикали выравнивается, на поверхности она понижается, а в придонных слоях и температура дна повышается. Этот процесс хорошо иллюстрируется температурным профилем вдоль Шекснинского потока от ст. 23 к центру водохранилища, построенным по данным той же съемки (рис. 3, б). В правой части профиля, примыкающего к центру

водохранилища, мы наблюдаем хорошо выраженное температурное расслоение водной массы. Температура поверхностного прогретого слоя воды 17—18, а дна всего 8—9°, температурный скачок на глубину 2—5 м, с вертикальными градиентами 2° на 1 м и более препятствует прогреванию нижележащих слоев. По мере удаления от центральной части температурный скачок становится более расплывчатым и затем исчезает, и в районе ст. 23 уже наблюдается полная гомотермия с температурами 15° у поверхности и дна. Таким образом, как во время съемки 9 V 1960 (рис. 2, а и 3, а), так и во время съемки 3 VI 1960 (рис. 2, б и 3, б), в частях плесов, удаленных от центра водохранилища, дно имело температуру на 6—7° выше, чем в центральных частях, но произошло это по разным причи-

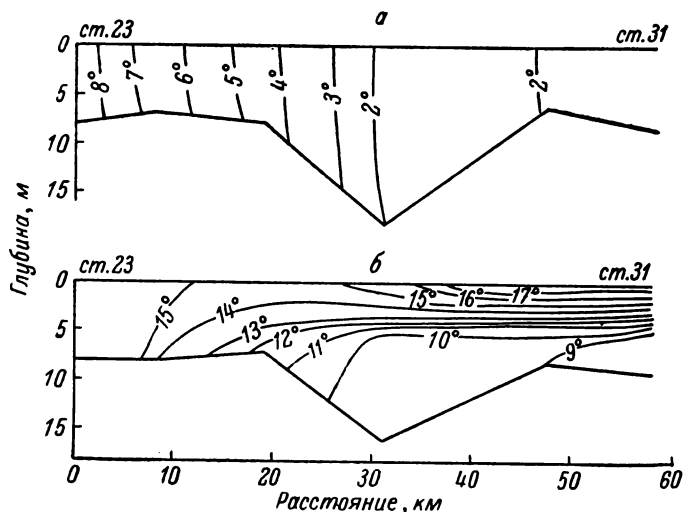


Рис. 3. Температурный продольный разрез Шекснинского плеса.

а — 9 V; б — 3 VI 1960.

нам. В первом случае прогрев дна был вызван поступлением большего объема теплых речных вод второй фазы половодья, во втором случае поступлением тепла от прогретых солнечной радиацией верхних слоев воды в результате перемешивания водных масс под влиянием стоковых течений.

Рассматривая весенний прогрев водных масс и дна Рыбинского водохранилища, нельзя не отметить одной интересной его особенности — вода и дно водохранилища у юго-западного берега прогревается больше и быстрее, чем у северо-восточного. Объяснить это можно влиянием трех факторов, действующих совместно или раздельно, в зависимости от сложившихся гидрологических и климатических условий: частым запаздыванием поступления паводочных вод из Шексны в водохранилище; поступлением большего количества вод бокового стока с юго-западного берега, чем с северо-восточного; наконец, преобладающим таянием льда у северо-восточного берега.

В 1960 г. паводочные воды поступили в водохранилище почти одновременно из всех крупных притоков и вызвали прогрев дна в речных плесах. В другие же годы поступление Шекснинских паводочных вод часто запаздывает, они втекают в водохранилище с более низкой температурой, так как водосбор Шексны расположен в более северных районах, чем водосборы Мологи и Волги. Например, в середине мая 1961 г. из Мологи и Волги поступали в водохранилище паводочные воды с темпера-

турой 8—10°. Они вызывали повышение донных температур в соответствующих плесах и образование зон с большими горизонтальными градиентами, а из Шексны поступали воды первой фазы паводка с температурой 2—3°, и температура дна всего Шексинского плеса мало отличались от зимней. Поступление большого количества паводочных вод из Шексны с сравнительно низкой температурой задерживает прогрев вод в Шексинском плесе и прилегающих районах центральной части.

Площадь водосбора боковой приточности (малых рек и ручьев), впадающих в водохранилище с юго-западного берега, в несколько раз больше, чем втекающих с северо-восточного берега. Это обуславливает большой объем стока прогретых в конце паводка вод, поступающих на мелководья, примыкающие к юго-западному берегу. Кроме того, водосбор юго-западных мелких притоков имеет меньший коэффициент залесенности, что еще увеличивает объем паводка и температуру паводочных вод по сравнению с притоком с северо-восточного берега. Эти обстоятельства несомненно обеспечивают более высокую температуру в водах мелководий, примыкающих к юго-западному берегу по сравнению с температурой вод у северо-восточного берега. Наконец, остатки ледяного покрова под действием преобладающих на водохранилище ветрах западной четверти чаще переносятся к северо-восточному берегу и разрушаются там, задерживая прогревание воды.

Данные по температуре воды у юго-западного и северо-восточного берегов водохранилища приводятся по шести весенним синхронным съемкам за 4 года в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Различие в температурах в весенний период у юго-западного и северо-восточного берегов водохранилища

Дата	Горизонт 2 м		Горизонт 5 м	
	юго-западный берег	северо-восточный берег	юго-западный берег	северо-восточный берег
9 V 1960	5.9	3.2	5.1	3.2
3 VI 1960	17.2	15.3	14.5	9.7
12 V 1961	4.7	2.3	4.4	2.3
8 VI 1961	19.0	18.7	17.8	9.6
12 V 1962	7.5	6.5	7.5	6.5
14 VI 1963	13.1	13.0	13.0	12.9

В таблице для каждого берега приводится средняя температура из трех станций, расположенных вблизи берега (для юго-западного берега ст. 42, 43, 47, для северо-восточного берега ст. 28, 31, 35) (рис. 1). Приведенные данные характеризуют температуру прибрежных вод на горизонтах 2 и 5 м от поверхности, а также приблизительно температуру дна на тех же горизонтах, на близко расположенных к станциям участках. Температура на горизонтах 2 и 5 м во всех весенних съемках у юго-западного берега была на 1—2.5° выше, чем у северо-восточного, а максимальные различия на 5 м достигали 5 и 8°. Исключение составляет температурная обстановка во время съемки 14 VI 1964, когда сильное ветровое перемешивание привело к выравниванию температур по всему водохранилищу. Из приведенных данных также следует, что отмеченная разница в температуре сохраняется продолжительное время при общем повышении температуры. Подобная особенность весеннего распределения наблюдается не только в центральной части водохранилища,

но и в расширенных частях речных плесов. Для примера приведены температуры (табл. 2) по поперечному разрезу в нижней части Шекснинского плеса от северо-восточного до юго-западного берега. Расстояние между станциями по 5 км. Как видно из данных таблицы, температура повышалась от северо-восточного берега к юго-западному по всем горизонтам.

Т а б л и ц а 2

Температура на поперечном разрезе Шекснинского плеса 12 V и 8 VI 1961

Дата	№ стан-ций	Глу-бина, м	Горизонты от поверхно-сти, м			
			0.5	2.0	5.0	дно
12 V 1961	28	4.5	2.1	2.1	—	2.1
	28-а	9.0	3.0	2.8	2.8	2.7
	28-б	9.8	4.8	4.8	4.5	4.2
	29	5.2	6.3	6.2	6.2	6.2
8 VI 1961	28	6.0	18.5	17.4	8.5	8.0
	28-а	9.5	18.5	17.2	11.8	8.0
	28-б	10.5	18.7	17.6	11.4	8.5
	29	5.8	19.7	17.8	16.3	14.3

ЛЕТНИЙ СЕЗОН (VII—VIII)

Начало летнего сезона характеризуется тем периодом в режиме водохранилища, когда заканчивается его наполнение, уровень достигает максимальных значений, приточность резко уменьшается и влияние притоков на температуру водохранилища прекращается. К началу летнего периода заканчивается весенний прогрев водных масс и температура достигает значений, близких к максимальным. Сброс воды через ГЭС летом, как правило, превышает объем приточности, что вызывает постепенное понижение уровня водоема. Температура воды в летний период колеблется около максимальных значений с наступлением максимума в июле или августе. Уменьшение притока речных вод с иной температурой и ветровое перемешивание вод водоема сглаживают температурные различия по площади и по глубине. Интенсивное ветровое перемешивание вод способствует быстрому проникновению тепла в придонные слои и в грунт. Высокий прогрев придонных слоев и дна летом является особенностью Рыбинского водохранилища. Донные температуры здесь часто достигают значений 20—25°, тогда как в водоемах с меньшей площадью и меньшим ветровым перемешиванием водной толщи они на 10—15° ниже. Так, по наблюдениям Л. Л. Россолимо (1930), на оз. Белом в Косине (средняя глубина 4.2, наибольшая 13.5 м) все лето температура гипolimниона не превышает 8—10°.

Температурное расслоение водной массы и образование эпилимниона наблюдается на водохранилище летом сравнительно редко — в периоды со слабым устойчивым ветром или в штилевые дни. Под воздействием солнечной радиации поверхностные слои прогреваются и образуется слой температурного скачка на глубине 2—3, реже 4—5 м от поверхности воды. При длительном стоянии тихой погоды разница между поверхностными и донными температурами может достигать 8—10 и в отдельных случаях даже 15°. Следует заметить, что температурное расслоение водной массы на водохранилище — явление редкое и непродолжительное. По данным Рыбинской гидрометеорологической обсерватории, стратификация нарушается при ветрах более 4 м/сек. (Тачалов, 1959), а волнение в 2—3 балла через несколько часов после его развития ликвидирует слой температурного скачка (Рутковский, 1963).

12 VII 1960 была сделана съемка по сокращенной программе (20 станций). Материалы съемки показали, что температура дна водохранилища по сравнению с предыдущей весенней съемкой повысилась в плесовых участках на 3—4, а в центральных частях водохранилища на 10—12°.

что привело к выравниванию температуры дна на большей части водохранилища до $19-20^{\circ}$ (минимальная температура дна по материалам

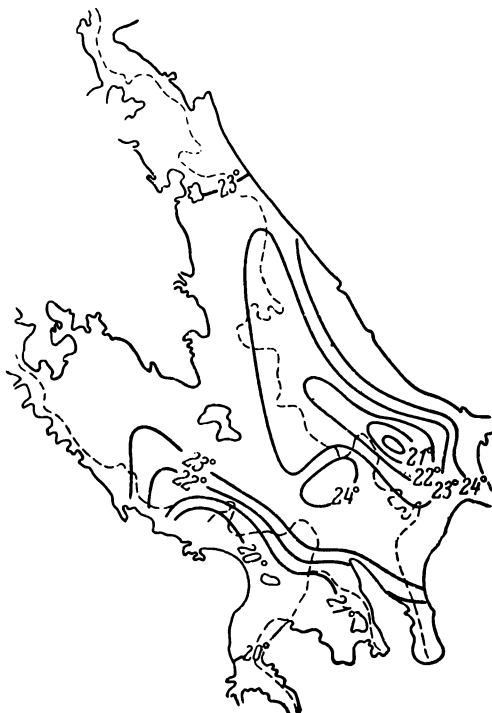


Рис. 4. Схема Рыбинского водохранилища с изотермами дна 28 VII 1960.

съемки 18.2 , максимальная 22.2°). Распределение температуры дна в период, близкий к максимальному прогреву, представляется по материалам съемки от 28 VII 1960 (рис. 4). Изотермы донных температур на схеме направлены вдоль затопленных русел и склонов, что свидетельствует о разной степени прогретости дна в зависимости от глубины. Участки с меньшими температурами дна ($20-22^{\circ}$) расположены в Центральном плесе вблизи затопленных русел Мологи и Шексны. Большая часть дна водохранилища имеет температуру $22-24^{\circ}$. Выше 24° дно прогрето в зоне, прилегающей к северо-восточному берегу, и в центре водохранилища на сравнительно мелководном Молого-Шекснинском междуречье. Более высокие температуры дна и придонных слоев на мелководных участках у северо-восточного берега в летний сезон наблюдаются и в другие годы. Обра-

зуются они, по нашему мнению, под влиянием нагона к северо-восточному берегу прогретых поверхностных слоев воды, вызываемого действием преобладающих на водохранилище ветров западной четверти.

ОСЕННИЙ СЕЗОН (IX—X)

Осенний сезон в водохранилище характеризуется падением уровня, уменьшением площади, объема и увеличением водообмена. Характерными особенностями температурного режима в этот период являются наличие постоянного теплового потока из водоема в атмосферу и охлаждение в связи с этим водной толщи за два осенних месяца в среднем на 15° .

Под действием частых штормов в осенний период происходит полное перемешивание всей водной массы водохранилища, и охлаждение ее происходит в условиях гомотермии как по площади, так и по глубине.

Характерные для середины осени температуры дна водохранилища представлены на рис. 5, а по материалам съемки от 4 X 1960. Температура дна по сравнению с предыдущей съемкой 28 VII 1960 г. понизилась на $13-15^{\circ}$. Преобладающие температуры дна водохранилища $8.5-9.5^{\circ}$ (минимальная температура 7.7 , максимальная 9.9°). Из всех главных притоков поступают водные массы с одинаковой температурой. Подобная термическая обстановка, когда температура по акватории водохранилища отличается на $1-2$, а по вертикали на $0.1-0.2^{\circ}$, очень характерна для всего осеннего периода в различные годы. На величину и распределение температур водной массы и дна влияют два фактора: ветер, вызывающий ветровое перемешивание и выравнивание температур в водоеме, и по-

стоянный тепловой поток в атмосферу, ведущий к общему снижению температуры во всей водной массе. Подобная термическая однородность сохраняется весь осенний период, и только перед ледоставом водная масса водохранилища, сохраняя гомотермию по вертикали, отличается в разных частях водохранилища на $4-5^{\circ}$, что связано с поступлением в этот период вод из главных притоков с иной температурой.

Предледоставный период — важный, но мало освещенный наблюдениями период годового термического цикла. Сбор материалов в это время представляет известные затруднения, так как судовая обстановка обычно уже снята, образуются обширные мелководья в результате снижения



Рис. 5. Схема Рыбинского водохранилища с изотермами дна.

a — 4 X; *b* — 27 X 1960.

уровня, плавает шуга и лед, частые туманы, короткий день — все это осложняет проведение съемок.

Обычно замерзание пресноводных озер идет по такой схеме: вода охлаждается до наибольшей плотности (4°), при этом распределение температуры по вертикали характеризуется прямой стратификацией, примерно около 4° наступает гомотермия, затем при дальнейшем охлаждении устанавливается обратная стратификация и с охлаждением поверхности воды до 0° происходит ледостав. Переход температуры воды через 4° и перемена знака вертикального градиента служат признаками разделения годового температурного цикла на сезоны. Эта классическая схема температурного режима озерных водоемов в период, предшествующий ледоставу, для Рыбинского водохранилища не подходит. Специфические условия водохранилища — его большая площадь при малых глубинах, сильные ветры в предледоставный период — обуславливают перемешивание всей водной массы и состояние гомотермии при температурах как выше, так и ниже 4° . Во время ослабления ветров бывают периоды со слабо выраженной прямой и обратной стратификацией при температурах в воде и выше и ниже 4° . После выхолаживания всей водной толщи до температуры, близкой к 0° , наступает ледостав.

Сроки замерзания водохранилища зависят от погодных условий. При резком похолодании и тихой погоде ледообразующие процессы протекают очень быстро на всей территории водохранилища и ледостав

может наступить даже в течение одного дня (например, в 1942 г.). В годы с затяжной осенью, когда кратковременные морозные периоды сменяются возвратом тепла, штормовая погода вызывает волнение и разрушение ледового покрова, ледообразование на водохранилище растягивается на 30—40 дней. Такой затяжной ледостав наблюдается осенью 1960 г., когда первые ледовые явления (забереги) были отмечены на водохранилище 20 X (в Шекснинском плесе), а полный ледостав в Центральном плесе наступил 14 XI, в Волжском — 15—18 XI. Таким образом, процесс ледообразования продолжался почти месяц. Характер осеннего ледообразования влияет на распределение донных температур в позднеосенний период и на сроки перехода с осеннего режима на зимний.

Распределение донных температур в период замерзания водохранилища представляется по материалам съемки от 27 X 1960 (рис. 5, б). Она была сделана в период, когда в водохранилище интенсивно развивались ледообразовательные процессы. К началу съемки ледостав был на значительной части Шекснинского плеса (в районе ст. 23—26) и в эстуариях мелких притоков. Во время съемки ледостав наступил на значительной части Моложского плеса, а на других участках водохранилища отмечались «сало», «снежница» и поля разрушенного волнением льда, дрейфующего под действием ветра.

Наиболее высокая температура дна была в Волжском плесе (3—4°). Охлаждению дна здесь препятствуют более теплые воды, сбрасываемые Угличской ГЭС. Сравнительно высокая температура воды Волжского плеса способствовала его более позднему замерзанию (15—18 ноября). В суженной части Моложского плеса температура дна была 1.0—1.2, в расширенной 1.2—1.5°. В Шекснинском плесе под сплошным ледяным покровом в 1—3 см температура в воде была 0—0.1, а на поверхности грунта 0.1—0.2°. В Центральном плесе сохранялся еще некоторый запас тепла, и температура в воде и на поверхности грунта составляла 2.0—2.2°. В дальнейшем эти последние запасы тепла быстро иссякают, температура воды и дна понижается до значений, близких к 0°, и здесь также наступает ледостав.

ЗИМНИЙ СЕЗОН (XI—III)

Замерзание водохранилища происходит обычно в середине ноября, вскрытие — в конце апреля; таким образом, зимний период продолжается на водохранилище более 5 месяцев. Существенной особенностью зимнего периода является повышенная проточность водохранилища по сравнению с другими сезонами. Коэффициенты водообмена зимой в 2 раза выше, чем летом. По данным Н. В. Буторина и Т. Н. Курдиной (1965), приток в водохранилище в среднем в зимнее время составляется из поступления водных масс Волги (46%), Мологи (9%), Шексны (17%) и мелких притоков (28%). Сброс воды в зимний период почти в 2 раза больше притока, что приводит к падению уровня и значительному уменьшению объема и площади водохранилища. Средняя величина осушаемой площади дна за зимний период составляет более 1000 км² (около 1/4 всей площади водохранилища).

Несмотря на значительное увеличение водообмена, в зимнее время отчетливо проявляется температурная неоднородность водной массы по площади и глубине. Прибрежная мелководная зона (до 3—4 м), занимающая зимой, так же как в любой другой сезон года, значительную площадь, имеет температуру дна меньше 1°. Исключение представляют мелководные участки, примыкающие к торфяным массивам, где температура дна и на небольших глубинах бывает выше (до 2—3°). Низкую температуру дна имеют также обладающие большой проточностью верхние

участки Моложского и Шекснинского плесов. Низкая температура дна наблюдается зимой во всем Волжском плесе ($0.1-0.3^{\circ}$), кроме того, холодные воды, поступающие в большом объеме из Волжского плеса, понижают температуру дна в прилегающей к нему южной части водохранилища.

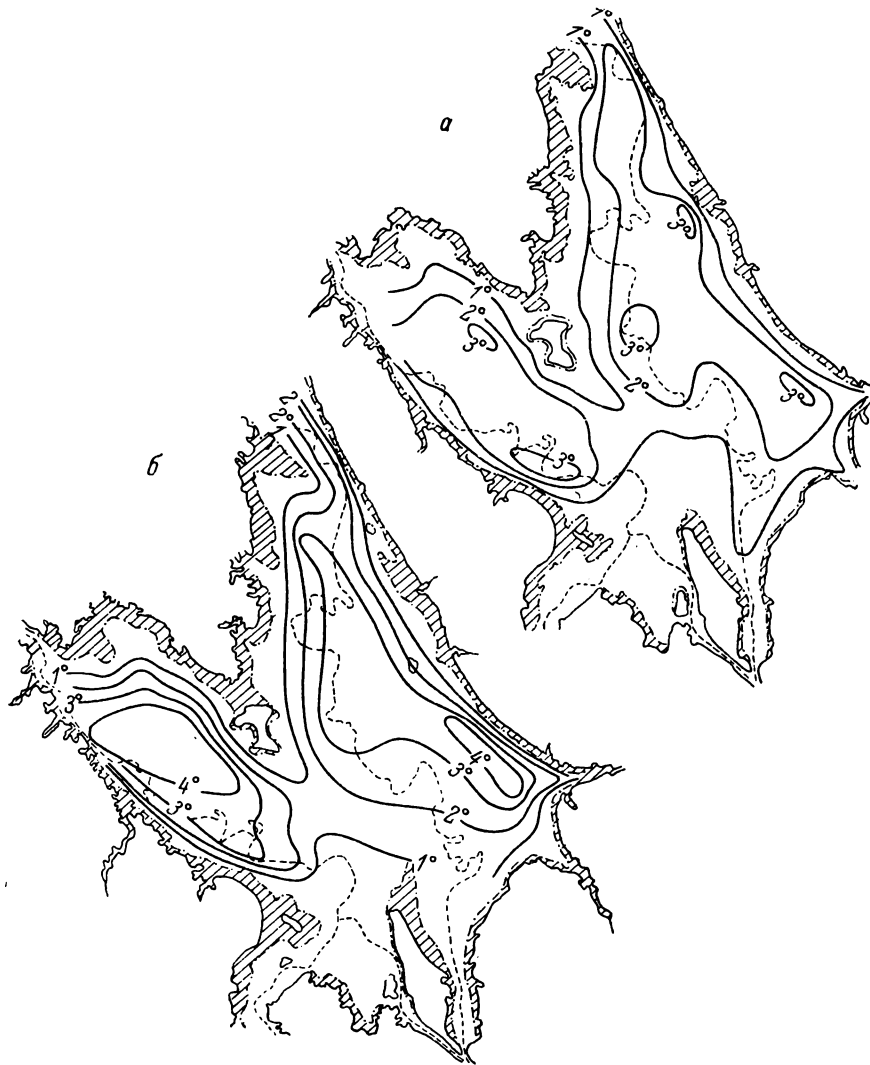


Рис. 6. Схема Рыбинского водохранилища с изотермами дна.

a — 19 II; *б* — 20 III 1961.

В центральных частях водохранилища наблюдается температурный режим, близкий к режиму малопроточных озер. Из грунта поступает накопленное в нем летом тепло, поверхность дна и придонные слои воды прогреваются до $2-3^{\circ}$, а в отдельные годы до $4-5^{\circ}$; при этом наблюдается ярко выраженная обратная стратификация и слой температурного скачка.

Распределение зимних температур дна в водохранилище рассмотрим по материалам съемок в феврале и марте 1961 г. (Бакастов, 1965).

В феврале 1961 г. наблюдалось характерное для середины зимы распределение температуры дна водохранилища (рис. 6, *a*). Изотерма 1° про-

ходит вдоль берега всего водохранилища, ограничивая прибрежную мелководную зону с более низкими температурами. Сравнительно низкая температура дна здесь обусловлена высокой теплоотдачей грунта через небольшой слой воды и лед в атмосферу, а также частично скатыванием более теплых и плотных вод в прирусловые участки. Эта общая для водохранилища картина нарушается в южной части водоема, где изотерма дна 1° , под влиянием поступающих холодных волжских вод, отклоняется далеко на северо-восток, ограничивая обширную зону, в которую входят не только мелководные участки, но и старые русла Мологи и Волги с глубинами до 16—18 м. Весь Волжский плес водохранилища имел в февральской съемке температуру дна $0.1-0.2^{\circ}$. Такие низкие температуры дна в этом районе обусловлены его большой проточностью, которая способствует выхолаживанию водной массы до температур, близких к 0° , и снижению температуры дна. Охлажденный волжский поток, составляющий зимой около половины от общего притока, поступая в водохранилище, вызывает снижение температуры дна всей его юго-восточной части (за исключением застойного Переборского залива) и отклонение изотерм дна к северу на десятки километров. Изотермы дна 1 и 2° образуют изгибы в направлении Сбросного плеса, что является отражением подсоса более теплых вод Центральной части к Рыбинской ГЭС.

В центральной части водохранилища выделяются два обособленных района с дном, прогретым до 2° и более (рис. 6, а). Один из них расположен по старому руслу и долине р. Мологи, другой по руслу и долине р. Шексны. Районы эти разграничивает Центральный мыс и затопленный водораздел между Мологой и Шексной, где температура дна ниже. Внутри этих районов выделяются участки с температурой дна более 3° . Эти небольшие по площади очаги с повышенной температурой возникают ежегодно в одних и тех же районах водохранилища. Образуются они различно. В одном случае они приурочены к глубоководным прирусловым участкам Мологи и Шексны в районах с небольшой их проточностью и являются следствием обычного температурного расслоения водных масс, характерного для всех малопроточных озер. В другом случае они образуются в сравнительно мелководных частях водохранилища с глубинами 2—5 м и образование их связано с поступлением теплых грунтовых вод.

Мартовская температурная съемка была сделана примерно через месяц после февральской при уровне водохранилища на 0.3 м ниже, чем во время предыдущей съемки. Расположение районов с более или менее прогретым дном осталось тем же, что и в феврале (рис. 6, б), но границы районов с более прогретым дном расширились. Изотерма 1° в марте проходила также вдоль берега, ограничивая прибрежную мелководную полосу, но несколько ближе к нему. В южной части водохранилища площади дна с пониженной температурой уменьшились, и изотермы 1 и 2° переместились на 10—15 км к югу.

В участках с повышенной температурой дна по Мологе и Шексне температуры дна еще несколько повысились. Если в феврале здесь наблюдались только небольшие очаги с температурой выше 3° , то в марте они увеличились и объединились в обширные районы. Площадь дна, прогретая свыше 3° , увеличилась за месяц примерно в 10 раз. В феврале на водохранилище не было ни одного участка с температурой дна выше 4° , а в марте они уже занимали значительные площади как по Мологе, так и по Шексне. Максимальные температуры дна отмечены по Мологе в районе ст. 39 (4.8°) и по Шексне в районе ст. 20 (4.6°). Как видно из приведенных материалов, во второй половине зимы 1961 г. происходило быстрое повышение температуры дна по всему водохранилищу. Интенсивность прогрева была различной. В непроточных районах с высокой температурой

дна она достигала $0.04-0.08^{\circ}$ в сутки, а в более проточных районах с низкой температурой составляла $0.006-0.01^{\circ}$ в сутки.

Интенсивный зимний прогрев водохранилища до самого вскрытия наблюдается лишь в годы с высоким зимним уровнем при небольшой его сработке. В годы с низким уровнем или с интенсивной его сработкой температура дна повышается только до $2-3^{\circ}$ (в марте), а к вскрытию водохранилища она опять несколько снижается.

Таким образом, произведенный анализ материалов по температуре дна Рыбинского водохранилища показал, что распределение донных температур в каждый сезон года имеет специфические особенности и формируется под влиянием вполне определенных гидрологических и метеорологических факторов.

ЛИТЕРАТУРА

- Бакастов С. С. 1965. Распределение и динамика температуры дна Рыбинского водохранилища в зимний период. В сб.: Динамика водных масс водохранилищ, изд. «Наука», М.—Л.
- Буторин Н. В. 1965. Синхронные гидрологические съемки на Рыбинском водохранилище. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7.
- Буторин Н. В. и Т. Н. Курдина. 1965. Характеристика гидрологических сезонов Рыбинского водохранилища. В сб.: Биологические процессы во внутренних водоемах, изд. «Наука», М.—Л.
- Ершова М. Н. 1962. О распределении талых вод в Рыбинском водохранилище перед его вскрытием. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 13, М.—Л.
- Россолимо Л. Л. 1930. Термика Косинских озер. Тр. биол. станции в Косине, вып. 10.
- Рутковский В. И. 1963. Температурный режим Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 5.
- Тачалов С. Н. 1959. Термический режим Рыбинского водохранилища. Сб. работ Рыбинской гидрометобсерватории, вып. 1.
-

НАКОПЛЕНИЕ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В РЫБИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Состав грунтового комплекса Рыбинского водохранилища изучен к настоящему времени достаточно детально: установлены основные закономерности формирования, границы распространения и физико-механические свойства донных отложений, намечены пути дальнейших изменений как в составе всего грунтового комплекса, так и отдельных типов донных отложений, входящих в него (Курдин, 1959, 1960, 1961а).

В задачу дальнейших исследований донных отложений входило определение величины и темпов их накопления. Для этого были использованы материалы съемок мощности донных отложений водохранилища, произведенных в 1960, 1962 и 1965 гг. Мощность донных отложений определена на 721 станции. Пробы отбирались трубкой ГОИНа.

Большие различия в гидрологическом режиме и морфометрии отдельных участков водохранилища, различная степень обеспеченности грунтообразующим материалом привели к большому разнообразию в мощности донных отложений. Учитывая это обстоятельство, мы отказались от определения сред-

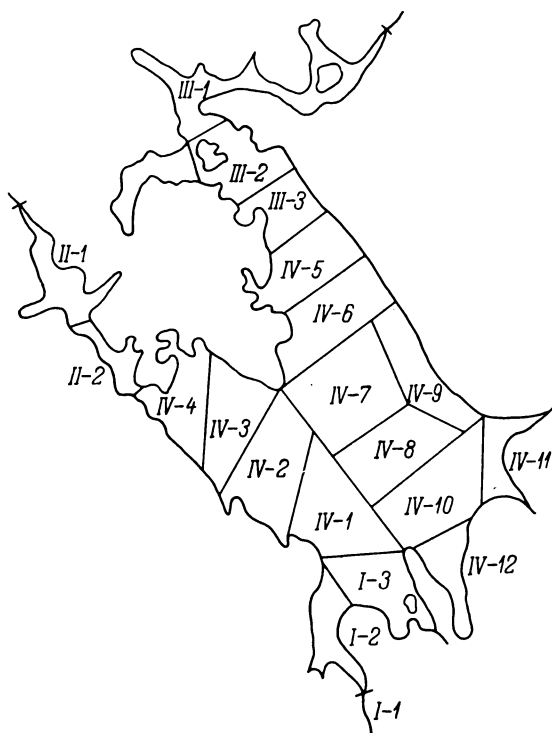


Рис. 1. Деление водохранилища на участки, в которых определялись объемы заиления.

ней для водохранилища высоты слоя каждого типа отложений, как это делалось ранее (Трифенова, 1964), и пошли по пути определения объемов заиления отдельных участков (рис. 1). В пределах выделенных участков более или менее однородны морфометрия и гидрологический режим, а следовательно, и условия седиментации взвесей. Для каждого участка определялась средняя высота слоя отложений в определенных интервалах глубин. Объем материала, отложившегося в каж-

дом интервале, определялся как произведение средней высоты слоя отложений на площадь, занимаемую данными глубинами. Объемы материала, отложившегося на всех глубинах, суммировались и определялся общий объем заиления данного участка.

По составу донных отложений, зависимости их распределения от морфометрии и гидрологического режима В. П. Курдин (1959) выделял на водохранилище три типа районов. К первому типу относятся речные плесы, ко второму и третьему — части Главного плеса к западу и к востоку от линии Рожновский мыс—Центральный мыс, находящиеся под преимущественным влиянием соответственно моложско-волжских и шекснинских вод.

Рассмотрим закономерности накопления донных отложений в речных плесах. Верхний участок Волжского плеса, обозначенный на схеме I-1, находится под непосредственным воздействием Угличской ГЭС и характеризуется наличием стоковых течений в течение большей части года. Скорости стоковых течений достаточны для поддержания взвесей, поступающих в плес и образующихся в нем, во взвешенном состоянии. В русловой части этого участка на глубинах более 8 м в 1960 г. встречался местами лишь наилот серого ила высотой до 3 мм.¹ Повторное обследование в 1966 г. показало, что за период 1960—1966 гг. накопления донных отложений в русловой части не произошло. Следовательно, тонкий слой наилка в русле имеет сезонное происхождение, т. е. отлагается в периоды, когда стоковые течения минимальны, и смывается в периоды большой проточности.

Ниже впадения р. Юхоть, где заметно расширяется пойма и происходит увеличение различий в скоростях по ширине потока, на глубинах 2—8 м полного смыва отложений, представленных здесь серым илом,

Таблица 1

Накопление донных отложений в Волжском плесе

Участок	Глубины при НИП, м	Тип отложений	Высота слоя к 1965 г., см	Среднегодовое накопление, см	Площадь, км ²	Объем, км ³
I-1	0—2	Серый ил	4.0	0.16	29.2	0.00118
	2—8	Серый ил	6.5	0.26	12.0	0.00078
I-2	4—6	Песчанистый серый ил . . .	4.6	0.18	29.8	0.00137
	6—8	Песчанистый серый и серый ил	13.4	0.54	29.5	0.00395
	8—10	Песчанистый серый ил . . .	22.0	0.88 *	6.0	0.00132
	10—14	То же	38.0	1.52 *	9.0	0.00342
	> 14	» »	1.2	0.05	3.0	0.00004
		» »	35.0	1.40 *	4.8	0.00168
I-3	0—4	» »	2.1	0.08	18.0	0.00038
	4—6	Серый ил	38.0	1.52	17.0	0.00646
	6—8	Песчанистый серый ил . . .	4.6	0.18	69.5	0.00320
	8—10	Серый и песчанистый серый ил	20.2	0.81	16.2	0.00327
	10—14	Серый и переходный ил . . .	78.0	3.12	8.2	0.00640
	> 14	То же	48.0	1.92	8.1	0.00389
Всего			—	—	—	0.03734

¹ Типы отложений даются по В. П. Курдину (1960).

* Ниже Коприна.

не происходит и наблюдается постепенное их накопление. На малых глубинах (0—2 м) темпы накопления серого ила несколько меньше, поскольку здесь происходит взмыв отложений под воздействием волнения и перемещение части образующихся взвесей на большие глубины. Темпы и объемы накопления донных отложений на участке представлены в табл. 1.

На участке 1-2 (до Коприна) на глубинах, больших 14 м, наилот серого ила имеет высоту слоя около 1 см. Начиная от Коприна, мощность отложений в стрежневой части русла возрастает в среднем до 35 см (с колебаниями от 4 до 83 см) с ясно выраженной тенденцией увеличения вы-

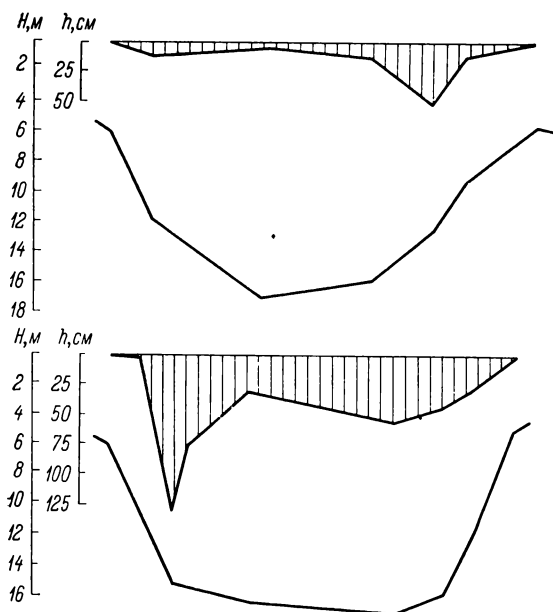


Рис. 2. Распределение мощности донных отложений по ширине Волжского плеса на участке 1—2.

$H, м$ — глубина при НПГ; $h, см$ — высота слоя отложений.

соты слоя вниз по длине русла. На склонах русла (глубины 10—14 м) мощность отложений, представленных песчанистым серым илом, несколько больше, чем в стрежневой части (табл. 1). Именно на склоне русла наблюдалась максимальная из измеренных на этом участке высота слоя, равная 127 см. На рис. 2 показано распределение мощности отложений по ширине участка на двух разрезах. В обоих случаях наибольшая высота слоя донных отложений наблюдается у подножья склона. Более интенсивное осадкообразование на склонах русла в речных плесах с отчетливо выраженными стоковыми течениями определяется распределением скоростей в поперечном сечении потока. Нужно отметить также, что мощность отложений на склонах русла значительно возрастает при

наличии поблизости примыкающих к склону размываемых мелководий или участков дна с глубинами, допускающими частичную пересортировку вторичных отложений. Большие объемы грунта, высвобождавшиеся при размыве мелководий в период формирования их рельефа, сносились в глубоководные участки водоема. Попадая на склон русла, они оказывались в зоне, где скорости течения недостаточны для их транспортировки, а большие глубины препятствуют волновому взмыву. Все это приводило к интенсивной аккумуляции материала на склоне. При больших уклонах под действием силы тяжести возможно, по-видимому, постепенное сползание отложившихся пластичных масс отложений к подошве склона. Аналогичное явление отмечается на некоторых озерах, где оно является одной из причин неравномерной мощности донных отложений (Wieckowski, 1963).

Начиная с низкой поймы, по мере уменьшения глубины мощность отложений постепенно уменьшается. На глубинах 4—6 м, как показали исследования размыва мелководий Волжского плеса (Курдин, 1965), находятся критические отметки, выше которых аккумуляция сменяется размывом. Поэтому на этих глубинах песчанистые илы уступают место илистым пескам и пескам. По мере расширения плеса и соответственного расширения зоны волнового воздействия на дно прослеживается умень-

пление высоты слоя отложений в этом интервале глубин: на отрезке Семенцево—Коприно средняя высота слоя 6 см, от Коприно до нижней границы участка — 3.2 см.

Глубины 0—4 м на участке I-2 заняты почвами, размываемыми почвами и песками, являющимися в большинстве случаев результатом размыва песчаных почв. Накопления донных отложений на этих глубинах, как правило, не происходит, за исключением некоторых изолированных от открытой части плеса мест (заливы, заостровные пространства).

Описанные закономерности распределения мощности отложений сохраняются в основном и на участке I-3. Отличительными чертами этого участка являются, во-первых, повышенные по сравнению с предыдущим темпы осадконакопления в русловых частях, что связано со значительным уменьшением проточности при выходе волжского потока в расширенную часть водохранилища (Буторин и Литвинов, 1963). Во-вторых, в связи с расширением акватории, увеличением разгона волн и расширением зоны волнового воздействия накопление отложений на этом участке начинается с глубин более 6 м. Глубины 0—6 м подвержены размыву и заняты преимущественно песками. Исключение составляют защищенные от сильного волнения участки (Переборский залив, Югский залив, пролив между Юршинским и Каменниковским островами), где глубины 0—6 м заняты песчаным серым и серым илом.

В Моложском плесе стрележневая часть русла занята аллювиальными незаиленными песками. Местами встречающийся тонкий слой песчаного серого ила (менее 5 мм) имеет сезонное происхождение. На склонах русла (на участке II-1 глубины 8—10 м, а на участке II-2 и глубины 10—14 м) мощность отложений резко возрастает (табл. 2) по тем же причинам, что и в Волжском плесе.

Т а б л и ц а 2
Накопление донных отложений в Моложском плесе

Участок	Глубины при НПП, м	Тип отложений	Высота слоя к 1965 г., см	Среднегодовое накопление, см	Площадь, км ²	Объем, км ³
II-1	0—4	Илистый песок, песчаный серый ил	1.6	0.06	89.2	0.00143
	4—6	Пылеватый песок, песчаный серый ил, серый ил	3.1	0.12	25.3	0.00078
	6—8	Серый ил, илистый песок . .	1.5	0.06	24.3	0.00036
	8—10	Серый песчаный ил	28.0	1.12	3.2	0.00089
II-2	0—4	Пылеватый песок, мелкий илистый песок	2.0	0.08	55.0	0.00110
	4—6	Пылеватый песок, песчаный серый ил, серый ил	3.1	0.12	14.6	0.00045
	8—10	Песчаный серый ил	28.0	1.12	1.6	0.00045
	10—14	Песчаный серый ил, пылеватый песок	5.1	0.2	5.5	0.00028
Всего			—	—	—	0.00574

Мощность отложений на поймах, подверженных волновому воздействию, очень невелика. Размываемые почвы в плесе встречаются сравнительно редко. По-видимому, волнение, развивающееся в плесе, недостаточно для интенсивного размыва мелководий. В Весьегонском расширении развития волнения препятствует значительная изрезанность береговой линии и наличие большого количества островов.

В Шекснинском плесе накопление отложений в русловой части начинается с верхнего участка (табл. 3). На участках III-2 и III-3 наибольшая высота слоя наблюдается на глубинах более 14 м.

Т а б л и ц а 3

Накопление донных отложений в Шекснинском плесе

Участок	Глубины при НПП, м	Тип отложений	Высота слоя к 1965 г., см	Среднегодовое накопление, см	Площадь, км ²	Объем, км ³
III-1	0—4	Илистый песок, песчанистый серый ил, серый ил . . .	1.5	0.06	243.1	0.00364
	4—6	Серый ил	5.0	0.20	53.0	0.00265
	6—8	Серый ил	7.0	0.28	1.9	0.00013
	8—10	Песчанистый серый ил, серый ил	25.5	1.02	2.9	0.00074
	> 10	Песчанистый серый ил . . .	22.0	0.88	9.9	0.00218
III-2	4—6	Илистый песок	2.5	0.10	42.3	0.00106
	6—8	Серый ил	12.5	0.50	40.3	0.00504
	8—10	» »	6.3	0.25	0.2	0.00001
	10—14	» »	13.0	0.52	4.5	0.00056
	> 14	» »	45.0	1.80	3.5	0.00158
III-3	6—8	Илистый песок, песчанистый серый ил, серый ил . . .	2.5	0.10	60.9	0.00152
	8—10	Серый ил	9.5	0.38	17.9	0.00170
	10—14	» »	27.0	1.08	3.9	0.00105
	> 14	Серый ил, переходный ил . .	65.0	2.60	3.3	0.00214
Всего			—	—	—	0.02400

Эти особенности обусловлены малой проточностью плеса. Взвеси, оседающие в наиболее глубоких его частях, не подвергаются в дальнейшем трансседиментации под воздействием стоковых течений. Кроме того, подошва склонов русла, где наблюдается наибольшая аккумуляция отложений, располагается на этих участках ниже изобаты 14 м. В остальном распределение мощности отложений в Шекснинском плесе не отличается существенно от такового в Волжском и Моложском плесах.

Приводимые данные о распределении мощности донных отложений в речных плесах свидетельствуют, что интенсивность накопления отложений по длине плеса изменяется на разных глубинах не однозначно. На малых глубинах, где преобладающей формой гидродинамической активности является волнение, интенсивность накопления отложений, достигнув сравнительно небольшого максимума на верхнем участке, уменьшается вниз по плесу до нуля. На больших глубинах, где подвижность водной массы определяется главным образом течениями, интенсивность накопления отложений возрастает вниз по плесу (рис. 3).

На Главном плесе водохранилища распределение мощности донных отложений характеризуется наибольшим разнообразием (табл. 4). Верхняя граница зоны аккумуляции подвержена значительным колебаниям в зависимости от гидродинамической активности водной массы на участках и механического состава первичных грунтов. Следует заметить, что первичные грунты восточной части плеса (участки IV-7—10) характеризуются более тяжелым механическим составом, чем западной его части. На большинстве участков (IV-3, 5, 7—12) аккумуляция отложений начинается в диапазоне глубин 4—6 м. Интенсивность накопления отложений на этих глубинах в открытых частях плеса очень невелика. Высота слоя отложений, представленных пылеватым песком, к 1965 г.

составляла всего 1—3 см. В тех местах, где высокая гидродинамическая активность водной массы сочетается с наличием легко поддающихся размыву первичных грунтов, граница зоны аккумуляции смещается на глубины 6—8 и даже 8—10 м (участки IV-1, 2, 6). Пространства, располагающиеся выше зоны аккумуляции, заняты размывными почвами, песками. Детальное обследование мелководий на участке IV-1 показало, что на глубинах 0—6 м происходил размыв первичных грунтов, следствием которого и явилось образование песков (первичный грунт, как правило, песчаная и супесчаная почва). Ниже изобаты 6 м размыв сменился аккумуляцией. На участках IV-2, 6 следы размыва прослеживаются местами вплоть до глубин 10 м.

Интенсивность накопления отложений в верхних горизонтах зоны аккумуляции повсеместно невелика (табл. 4). Иногда наблюдается резкое уменьшение высоты слоя отложений на глубинах 8—10 м при переходе от преимущественно песчаных отложений к преимущественно илистым (участки IV-3, 5). Это может вызываться значительными различиями в гидравлической крупности песчаных и илистых частиц. В общем, на тех центральных участках плеса, где глубины от 8 до 10 м заняты преимуще-

ственно илами, мощность илов очень невелика (0.5—4.8 см). Ниже изобаты 10 м располагается зона, на которую не распространяется размывающее действие волнения, в которой уменьшается вероятность трансседиментации и как следствие на большей части плеса резко увеличивается высота слоя отложений. В диапазоне глубин 10—14 м повышенные мощности иловых отложений (0.70—0.76 м) имеют место в пойменных озерах, старицах, протоках, площадь которых, по нашим подсчетам, составляет около 24 км². Условия илонакопления в таких местных углублениях существенно отличаются от условий на прилегающих к ним территориях. Углубления служат ловушками для трансседиментационных взвесей с окружающих пространств.

На глубинах более 14 м интенсивность илонакопления максимальна на всех участках. Высота слоя отложений к 1965 г. достигла 40—150 см. Исключение составляет участок IV-4 (табл. 4). Здесь на русловых станциях весной ежегодно прослеживаются стоковые течения, приводящие к смыву донных отложений, и распределение мощности по глубине сходно с наблюдающимся в речных плесах.

Сопоставление максимальной мощности отложений на различных участках Главного плеса показывает, что на больших глубинах не прослеживается четкой связи интенсивности илонакопления с гидродинамической активностью. По-видимому, в данном случае решающую роль может играть местоположение, характер источников и объем поступающего на участок грунтообразующего материала.

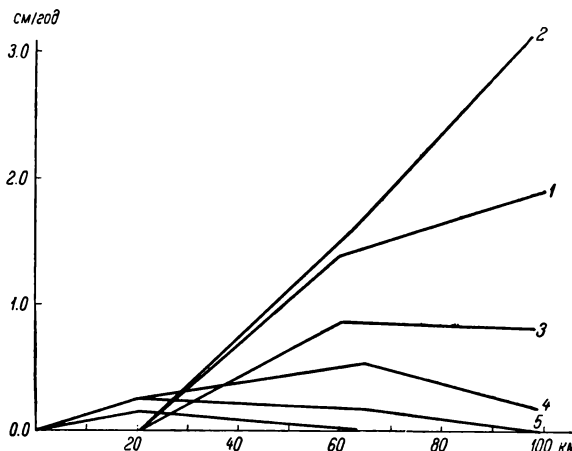


Рис. 3. Изменение интенсивности накопления донных отложений по длине Волжского плеса на различных глубинах.

1 — глубины больше 14 м; 2 — 10—14 м; 3 — 8—10 м; 4 — 6—8 м; 5 — 4—6 м; 6 — 0—4 м.

Т а б л и ц а 4

Накопление донных отложений в Главном плесе

Участок	Глубины при НПП, м	Тип отложений	Высота слоя к 1965 г., см	Среднегодовое накопление, см	Площадь, км²	Объем км³
IV-1	6—8	Пылеватый песок	2.4	0.096	81.8	0.00196
	8—10	Песчанистый серый ил	4.8	0.19	116.6	0.00560
	10—14	Серый ил	76.0	3.04	4.5	0.00342
		Серый ил, торфянистый ил . .	18.5	0.74	10.8	0.00200
	> 14	Серый ил, переходный ил . . .	131.0	5.25	6.2	0.00811
IV-2	6—8	Серый ил	7.0	0.28	1.0	0.00007
	8—10	Пылеватый песок, серый ил . .	4.4	0.18	125.6	0.00553
	10—14	Серый ил, переходный ил . . .	6.9	0.28	53.3	0.00368
		Серый ил	76.0	3.09	15.8	0.01200
	> 14	» »	47.0	1.88	3.0	0.00141
IV-3	4—6	Пылеватый песок	3.0	0.12	63.1	0.00189
	6—8	Пылеватый песок, песчанистый серый ил	6.4	0.26	78.9	0.00505
	8—10	Серый и переходный ил	2.7	0.11	53.6	0.00145
	10—14	Серый ил	29.0	1.16	33.0	0.00957
	> 14	Переходный ил	93.0	3.72	3.5	0.00326
IV-4	0—4	Пылеватый илистый песок . .	1.0	0.04	143.9	0.00144
	4—6	Илистый песок, песчанистый серый ил	10.5	0.42	31.9	0.00335
	6—8	Песчанистый серый ил, серый ил	9.5	0.38	7.5	0.00071
	8—10	Серый ил	10.0	0.40	0.1	0.00001
	10—14	Песчанистый серый ил, илистый песок	12.0	0.48	3.4	0.00041
	> 14	Песчанистый серый ил	4.5	0.18	3.1	0.00014
IV-5	4—6	Пылеватый песок	2.0	0.08	42.8	0.00086
	6—8	Пылеватый песок, песчанистый серый ил, переходный ил	8.0	0.32	33.8	0.00270
	8—10	Пылеватый песок, торфянистый ил	0.5	0.02	28.1	0.00014
	10—14	Переходный ил	70.0	2.80	4.0	0.00280
		» »	24.6	0.98	6.8	0.00167
IV-6	> 14	» »	41.0	1.64	1.4	0.00057
	8—10	Песчанистый серый ил	0.8	0.03	41.7	0.00033
	10—14	Серый и переходный ил	11.5	0.46	39.0	0.00449
	> 14	Торфянистый ил	50.0	2.0	4.4	0.00220
IV-7	0—4	Торфянистый ил	5.0	0.2	10.0	0.00050
		Пылеватый песок	1.0	0.04	11.8	0.00012
	4—6	Торфянистый ил	12.0	0.48	6.0	0.00072
	6—8	Илистый песок	1.1	0.04	44.2	0.00049
	8—10	Илистый песок, песчанистый серый ил	2.2	0.09	21.3	0.00047
IV-8	10—14	Торфянистый и переходный ил	14.7	0.59	137.3	0.02020
	> 14	Торфянистый ил	50.0	2.0	2.4	0.00120
IV-8	4—8	Пылеватый песок	1.5	0.06	109.9	0.00165
	8—10	Серый ил	1.5	0.06	71.4	0.00107
	10—14	Торфянистый и переходный ил	28.0	1.12	74.7	0.02100
	> 14	Торфянистый ил	130	5.20	3.1	0.00404
IV-9	0—4	» »	10.5	0.42	50.0	0.00525
	4—6	» »	10.5	0.42	30.0	0.00315

Таблица 4 (продолжение).

Участок	Глубины при НПГ, м	Тип отложений	Высота слоя к 1965 г., см	Среднегодовое накопление, см	Площадь, км ²	Объем, км ³
IV-9	6—8	Пылеватый песок	2.4	0.1	46.6	0.00112
	8—10	Песчанистый серый ил	2.0	0.08	32.6	0.00065
	10—14	Торфянистый ил	23.0	0.92	28.6	0.00657
	> 14	» »	28.0	1.12	12.0	0.00336
IV-10	4—8	Пылеватый песок	1.0	0.04	128.3	0.00128
	8—10	Пылеватый песок, переходный ил	9.2	0.38	61.4	0.00564
	10—14	Серый ил, переходный ил	9.0	0.36	79.1	0.00711
	> 14	Переходный и торфянистый ил	150	6.0	3.9	0.00465
IV-11	4—6	Мелкий песок, серый, переходный, торфянистый ил	12.4	0.50	46.0	0.00570
	6—8	Переходный и серый ил	26.5	1.06	22.4	0.00594
	> 8	Серый и торфянистый ил	85.5	3.42	0.3	0.00026
IV-12	4—6	Пылеватый песок	12.4	0.50	40.3	0.00500
	6—8	Переходный ил	11.0	0.44	29.9	0.00329
	8—10	Переходный и торфянистый ил	43.0	1.72	15.3	0.00658
	10—14	То же	75.0	3.0	12.0	0.00900
	> 14	» »	108.0	4.32	3.0	0.00324
Всего			—	—	—	0.21607

Подводя итог характеристике накопления донных отложений в Главном плесе, можно сказать, что основной отличительной чертой его является меньшая, чем в речных плесах, мощность вторичных грунтов на большей части дна выше изобаты 10 м, за исключением изолированных от открытой части водохранилища участков.

В табл. 1—4 приводится средний за 25-летний период годовой слой отложений на различных участках по глубинам. Из-за отсутствия годичной слоистости в отложениях не представляется возможным судить об изменениях в интенсивности заиления во времени непосредственно по колонкам отложений. Однако можно предполагать, что в первые годы существования водохранилища интенсивность осадкообразования была больше, чем в последующие. В начальный период большую роль в образовании вторичных отложений играли местные источники грунтообразующего материала, в первую очередь размыв ложа водоема и торфяных сплавин. К настоящему времени поступление материала за счет размыва берегов и дна водоема значительно сократилось, так как формирование рельефа и грунтов мелководий в основном закончилось, а размыв дна на остальной части водоема имеет результатом в большинстве случаев не образование новых отложений, а лишь трансседиментацию образованных ранее. В 60-е годы заметно сократилось образование новых торфяных сплавин, а существовавшие сплавины, доступные волнению, были к этому времени разрушены. Сокращение поступления материала из указанных местных источников несомненно вызвало уменьшение интенсивности осадкообразования.

Игнорирование местных источников грунтообразующего материала при прогнозе заиления Рыбинского водохранилища привело к значительным расхождениям между расчетными и фактическими объемами заи-

ления. По прогнозу, данному В. П. Матвеевым (1950), объемы заиления за 25 лет выражаются следующими цифрами (км³):

Участок Волжского плеса I-1	0.0019
Моложский плес	0.0025
Шекснинский плес	0.0028
Остальная часть водохранилища	0.0282

Всего 0.0354

Фактический объем заиления водохранилища в 1965 г. равнялся 0.283 км³. Сравнение показывает, что только для проточного участка Волжского плеса (I-1), где местные источники грунтообразующего материала не могли иметь существенного значения, прогноз оправдался. Для всех остальных участков водохранилища фактические объемы заиления в 2—9 раз превосходят расчетные. Приводимый выше прогноз основан на предпосылке, что основными факторами заиления являются твердый сток рек и переформирование берегов. Это справедливо для водохранилищ руслового типа. Для больших водохранилищ, затопивших значительные пространства долин и водоразделов рек, протекающих в зоне сравнительного слабого развития эрозионных процессов, расчет по такой схеме без учета местных источников грунтообразующего материала не может дать удовлетворительных результатов. Опыт изучения донных отложений Рыбинского водохранилища показывает также, что прогнозируемая обычно на основе балансовых расчетов средняя высота слоя отложений без дифференцирования ее по участкам и глубинам имеет для большого водоема чисто формальный характер и не отражает происходящих в нем процессов.

Сведения о скорости осадконакопления в других водохранилищах, расположенных в сходных физико-географических условиях, приводятся в работах В. П. Курдина (1961б, 1963). В русловых углублениях приплотинных, наименее проточных частей Ивановского и Угличского водохранилищ скорость илонакопления составляла соответственно 1.3—2.4 и 1.1—3.8 см/год. Эти величины близки к наблюдающимся в расширенных, малопроточных частях речных плесов Рыбинского водохранилища. В русловых углублениях Главного плеса Рыбинского водохранилища скорость илонакопления в среднем по участкам больше (0.2—6.0 см/год). Скорости илонакопления на поймах (глубины 4—8 м) в приплотинных частях Ивановского, Угличского и речных плесах Рыбинского водохранилища также близки между собой и значительно больше, чем на соответствующих глубинах центральной части Рыбинского водохранилища в связи с большими размерами и обеспеченностью волнения в этой его части. Таким образом, сравнение трех различных по гидрологическому режиму водохранилищ показывает, что интенсивность накопления донных отложений в отдельных частях каждого определяется видом и степенью гидродинамической активности. Это обстоятельство необходимо в первую очередь учитывать при проведении аналогий между водоемами, расположенными в сходных физико-географических условиях.

В заключение необходимо предостеречь от расчетов сроков заполнения чаши водохранилищ отложениями по среднегодовым показателям скорости заиления, найденным для начального периода существования водоемов, точнее, до момента окончания интенсивной переработки рельефа ложа водохранилищ, особенно тех, которые имеют обширные озеровидные расширения. После завершения процесса переформирования берегов и ложа водохранилища роль автохтонного грунтообразующего материала резко снижается, последующие годовые приросты мощности отложений становятся значительно меньше. Ошибки при расчете сроков заиления

по среднегодовым показателям будут меньше для водохранилищ долинного, и особенно руслового, типа, где аллохтонный грунтообразующий материал значительно преобладает над автохтонным.

ЛИТЕРАТУРА

- Б у т о р и н Н. В. и А. С. Л и т в и н о в 1963. О течениях в Рыбинском водохранилище. В сб.: Биологические аспекты изучения водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 6.
- К у р д и н В. П. 1959. Классификация и распределение грунтов Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 1.
- К у р д и н В. П. 1960. О классификации и происхождении грунтов водохранилищ. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 8—9.
- К у р д и н В. П. 1961а. Основные положения о процессах образования и распределения грунтов в верховолжских водохранилищах. Тр. Всесоюз. сов. по биол. основам рыбохоз. освоения водохр. Изд. АН СССР, М.—Л.
- К у р д и н В. П. 1961б. Грунты Иваньковского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 4.
- К у р д и н В. П. 1963. Условия формирования грунтового комплекса Угличского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 5.
- К у р д и н В. П. 1965. Формирование рельефа и грунтов банок расширенной части Волжского плеса Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7.
- М а т в е е в В. П. 1950. Рыбинское водохранилище. Тр. Гос. гидрол. инст. вып. 7.
- Т р и ф о н о в а Н. А. 1964. О накоплении соединений азота в донных отложениях Рыбинского водохранилища. Совещ. по вопр. круговорота вещества и энергии в озерных водоемах. Тез. докл. Лиственничное на Байкале.
- W i e s k o w s k i K. 1963. Preliminary results of examinations of bottom deposits in the Large Masurian Lakes. Bull. Acad. polon sci., ser. sci. geol. et geogr., v. 11, № 2.

ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА И СВОЙСТВ ВОДЫ р. МОСКВЫ В СВЯЗИ С ЗАГРЯЗНЕНИЕМ И ПРОЦЕССАМИ САМООЧИЩЕНИЯ

Регулирование стока текущих водоемов существенно изменяет гидрологический режим рек, в первую очередь за счет более или менее значительного выравнивания стока по сезонам. При многолетнем регулировании устраняется весеннее половодье, на долю которого в равнинных реках приходится 60—80% годового расхода воды. При полном зарегулировании расход воды ниже плотины определяется в основном потребностями народного хозяйства.

Замедление течения изменяет условия распределения сточных жидкостей в водоемах, приближает место выпадения взвесей к точке выпуска стоков. При расчетах кислородного баланса в теплое время года решающим фактором может стать в некоторых условиях развитие процессов фотосинтеза. В процессах самоочищения значительно усиливается роль растительных организмов и зообентоса, до настоящего времени еще слабо изученная. Вместе с тем условия развития процессов самоочищения в искусственных водоемах замедленного стока отличаются от озерных. Так, в большинстве водохранилищ волжского и днепровского каскадов сохраняется весенняя промывка русла и связанные с этим унос или перемещение донных отложений.

Развитие процессов самоочищения зависит от характера реки, способов регулирования и качества загрязнений. Для выяснения общих закономерностей необходимо накопление результатов длительных наблюдений.

К числу зарегулированных и максимально используемых в народном хозяйстве водоемов относится р. Москва. Исследования р. Москвы насчитывают более чем столетнюю давность. Первые анализы ставили задачей определение состава растворенных в воде реки соединений. В дальнейших работах исследователи освещали санитарные вопросы загрязнения и самоочищения реки. Анализ проб, взятых в различных пунктах реки, вскоре был пополнен бактериологическими исследованиями. В начале текущего столетия получили большое распространение гидробиологические наблюдения, значительно позднее гельминтологические и радиометрические. Для изучения свойств и состава загрязнений реки обычно применялся проезд по реке или краткосрочные (два-три дня) стационарные наблюдения. В большинстве случаев наблюдения не связывались с гидрологическим режимом реки. Институтом биологии внутренних вод АН СССР в 1964 г. начаты исследования на р. Москве, касающиеся незатронутых или мало освещенных вопросов изменений качества воды. Слабо освещен в отечественной и зарубежной литературе вопрос об изменении основного солевого состава и соотношении катионов под влиянием бытовых и промышленных стоков. В опубликованных материалах почти нет данных об

изменении состава элементов, содержащихся в воде р. Москвы в следовых количествах — порядка сотых миллиграмма в литре и ниже. Между тем разнообразные промышленные стоки обогащают водоем свинцом, медью, никелем, хромом и другими металлами, в том числе такими редкими в природных водах, как серебро, молибден. Весьма существенным является вопрос о стабильности веществ, внесенных в водоем в микроколичествах. Распределение микрокомпонентов между водной массой, донными отложениями и гидробионтами определяет длительность пребывания микрокомпонентов в воде и дальность распространения. Данные о содержании и стабильности 14 элементов приведены в статье Г. В. Кольцова (1968).

Вопросы распределения в водоеме радиоактивных β -излучателей, находящихся в состоянии крайнего рассеяния, приведены в статье А. А. Былинкиной (1967). Влияние городских стоков на содержание и формы фосфора и азота, в значительной мере определяющих развитие фитопланктона, освещено путем наблюдений на загрязненных участках р. Москвы и р. Оки.

Влияние загрязнения водоема на донные отложения изучалось в основном с точки зрения изменений кислородного режима (Несмеянов, 1951), поскольку этот вопрос имеет непосредственно практическое значение. В связи с тем что под влиянием стоков изменяется трофность водоема, состав и количество гидробионтов, можно ожидать изменений химического состава донных отложений в отношении органической и минеральной части.

Отличительной чертой внешнего вида реки у преграждающих ее ниже города плотин является обильное пенообразование в нижнем бьефе. Весьма подходящие для пенообразования условия создаются при перепаде воды через плотины. Непосредственно после перепада воды река покрывается слоем пены, который вскоре распадается на отдельные островки, плывущие вниз по течению. В зависимости от направления ветра пена обычно прибывает к берегу, где отмечаются ее скопления, временами высотой до 1 м и более. Часть пены заносится ветром на берег, часть оседает у кромки и на прибрежной растительности. Основная масса органических и минеральных веществ, составляющих пену, поступает обратно в реку. Данные о пенообразовании на реке приведены в опубликованной нами ранее работе (Драчев и Былинкина, 1965).

В 1944—1948 гг. на р. Москве были проведены под руководством автора систематические исследования в пунктах постоянных наблюдений. Наблюдения ставили задачей выяснение процессов превращения органического вещества и связанного с ним кислородного режима. Закономерности изменения сапрофитной микрофлоры в процессе самоочищения изучались Е. В. Диановой и А. А. Ворошиловой (1952), С. М. Драчевым и др. (1966). Данные о превращении органического вещества и кислородном режиме будут использованы в дальнейшем изложении.

Обширный аналитический материал, относящийся к наблюдениям, разделенным двадцатилетним сроком, позволяет сделать заключения об изменении состояния реки за истекший период и сравнить ход процессов самоочищения в различных условиях.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ РЕКИ В ПРОШЛОМ

Зарождение, развитие и само наименование столицы Советского Союза — г. Москвы тесно связано с одноименной, сравнительно не крупной водной артерией — Москвой-рекой. Под защитой реки и ее малых притоков Неглинки и Яузы образовался и оформился свыше 800 лет тому назад «град мал, деревян», которому суждено было много лет спустя стать многомиллионным городом.

В хозяйственной жизни столицы река имела существенное значение. Благодаря положению города на реке Москва стала «добрым мостом — распутием для сообщения во все стороны и во все края старинных народных сообщений» (Гейнике, 1917). Транспортное значение реки увеличилось с пуском канала им. Москвы в 1936 г.

Многие годы р. Москва была основным источником питьевого и хозяйственного водоснабжения прибрежных поселений. Каменных дел мастера, Антон Константинов и Трофим Шарутин, устроили в 1636 г. первый из известных московских водопроводов, подняв воду на башню Кремля, которая до сих пор носит название «водовозводная». Из реки качали воду насосные станции Бабыгородского и Краснохолмского водопроводов (1852—1835 гг.). До настоящего времени сохраняет свое значение для города забор питьевой воды (с 1903 г.) в верхнем течении р. Москвы у Рублева (Труды. . ., 1927; Тольцман, 1931).

Важное значение имеет река как приемник отходов бытовой, хозяйственной и промышленной жизни города. В прошлом внешние воды уносили не только огромное количество мусора, накопившегося по берегам реки на льду известного рынка у Москворецкого моста, но и нечистоты, специально вывозившиеся на лед в конце зимы. Особенно повысилось значение реки как приемника городских отходов со времени устройства городской канализации в 1898 г.

Изменение санитарного состояния реки под влиянием бытовой и хозяйственной жизни города было отмечено давно. Еще при царе Алексее Михайловиче (1629—1676 гг.) были выделены для водоснабжения царского двора пруды на Пресне. Очевидно, качество речной воды уже тогда не удовлетворяло требованиям к источнику водоснабжения, по крайней мере наиболее взыскательных потребителей. Очень крупное для своего времени строительство Мытищинского водопровода (указ 1779 г.) мотивировалось необходимостью обеспечить город безупречной по качеству питьевой водой, чего не гарантировала уже тогда более доступная вода из реки.

Началом лабораторного исследования следует считать 1835 г., когда московский химик Р. Ф. Герман (Искольдский, 1948) произвел первые анализы воды р. Москвы и прибрежных колодцев. Выполненные оригинальным ученым и выдающимся гидрохимиком анализы, отличавшиеся от современных формой выражения (в унциях на ведро) и методикой исследования, охватывали почти все обычно определяемые ныне ингредиенты солевого состава.

В последующее столетие река многократно привлекала внимание исследователей, ставивших задачей главным образом характеристику санитарного состояния.

В 1877 г., по поручению Городской управы, профессор химии Московского университета А. П. Собанев произвел обстоятельное исследование р. Москвы в трех пунктах: 1) выше города у с. Троицкого; 2) в черте города; 3) ниже города в Даниловской слободе (Коцин, 1889). К этому же времени относится опубликование гидрометрических данных (Астраков, 1878).

Крупной вехой на пути исследования не только Москвы-реки, но и вообще водоемов явилась работа М. Б. Коцина (1889). Наблюдениями был охвачен значительный участок реки. В работу включены описание водоема, химические и бактериологические анализы. Ряд наблюдений и исследований был проведен на реке в последующие тридцать лет (Бубнов, 1902, 1907; Никитинский, 1909, 1912; Соколов, 1911, 1922; Орлов, 1912; Наумов, 1913; Строганов, 1913; Коцин, 1915). Если химические методы впервые применены к изучению р. Невы (1773 г.), то бактериологические, гидробиологические, гельминтологические (Василькова, 1944), радио-

метрический (Драчев, Былинкина, 1960) впервые были широко и систематически использованы при исследовании р. Москвы.

Выдающийся ученый Я. Я. Никитинский, под влиянием работ которого сформировалась русская санитарная гидробиология, провел на р. Москве исследования планктона, обростаний, донных биоценозов. Эти исследования опубликованы в Отчетах Временного комитета по охране водоемов Московской губернии (1912—1916 гг.). Большие изыскательские работы были проведены (1913—1916 гг.) в связи с поисками новых источников водоснабжения г. Москвы. Итоги этих работ, опубликованные в 1927 г. (Озеров, Строганов), внесли крупный вклад в современное представление об основных факторах формирования солевого состава, ритме сезонных изменений, растительных и животных биоценозах рек.

Многочисленные обследования реки были произведены в период с 1920 по 1940 г. в целях оценки санитарного состояния отдельных участков выше и ниже города (Бруевич, 1927, 1929; Скопинцев, 1933; Знаменский, 1935, 1936; Кононов, 1936; Кононов и Ситнов, 1939; Скопинцев и Михайлов, 1939). Как правило, обследования проводились в сочетании с изучением санитарных условий; применялись химические, бактериологические и гидробиологические методы. Отличительной чертой большинства работ был одномоментный способ наблюдений; исследователи ставили задачей получение разового снимка состояния реки. На основе полученных данных Б. А. Скопинцевым (1933) и А. В. Знаменским (1935, 1936) были сделаны расчеты скорости процесса самоочищения и количества кислорода, поступающего из атмосферы.

Характеристика состояния реки была использована в работах С. Н. Строганова (1923) и С. А. Озерова (1929) для расчетов количества воды, необходимого для оздоровления реки путем разбавления водой канала им. Москвы. Прием разбавления был испытан у нас впервые. Некоторые работы, проведенные вскоре после пуска канала им. Москвы в эксплуатацию, дают оценку изменений режима реки этого периода (Кононов и Ситнов, 1939; Дексбах и Мусатова, 1940). Состояние р. Москвы в районе сброса стоков крупных очистных сооружений города систематически изучается лабораториями Мосочиствода и частично публикуется (Попова, 1959, 1964; Попова и Первакова, 1959).

В верхнем течении реки со времени пуска Рублевского водопровода до настоящего времени ведутся систематические наблюдения за качеством воды. Материалы химических и бактериологических исследований были обработаны С. А. Озеровым (1929). Современное представление об охране водоемов питьевого назначения от загрязнения, принципы и способы практического осуществления зон санитарной охраны на материалах р. Москвы обобщены в работах В. И. Мускат (1926, 1930, 1937).

ДАННЫЕ ПО ГИДРОМЕТРИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКЕ РЕКИ

Р. Москва — левый приток р. Оки — берет начало вблизи оз. Михальского на восточном склоне Средне-русской возвышенности. Длина реки 502 км, площадь бассейна питания 17 530 км² (Быков, 1951). По прямому направлению от истока до устья у г. Коломна 232 км, что дает коэффициент извилистости 2.16. В бассейне хорошо развита речная сеть: на всем протяжении река принимает 89 притоков, из которых многие в свою очередь имеют притоки. По И. Л. Здановскому (1926), общее число притоков равно 912. Главнейшие левые: Истра, Руза, Пехорка, Гжелка и Нерская, правые: Пахра, Северка, Коломенка.

Абсолютная высота истока реки 249 м, устья 104 м. Таким образом, средний уклон реки 0.00029, на участке от г. Москвы до устья 0.000034

(Кравченко, 1930). Продолжительность ледостава на реке в среднем 123 дня. Нормальный ледовый режим в городе и ниже впадения стока нарушен вследствие вноса в реку большого количества отбросного тепла с промышленными и бытовыми стоками.

В данное время естественный режим р. Москвы сохранился лишь в самом верховье; ниже г. Можайска сток реки регулируется: 1) крупными водохранилищами на притоках Истре, Рузе, Озерне и р. Москве у г. Можайска (Рябышев, 1964); 2) подачей воды из канала им. Москвы, через реки Сходню, Яузу и шлюзы; 3) наличием девяти невысоких плотин, из них пяти на участке ниже города.

Сток р. Москвы регулируется крупными водохранилищами в верховьях реки, постоянными плотинами, повысившими уровень реки в пределах города, и съёмными плотинами, поддерживающими судоходные уровни в навигационный период ниже города. Регулирование стока в верхнем течении р. Москвы было начато в 1934 г. строительством плотины на р. Истре и закончилось заполнением водохранилища на р. Озерне в 1967 г. Суммарный объем водохранилищ составляет 800 млн м³. При помощи плотин в верховье регулируется сток с 52% общей площади водосбора р. Москвы выше города. Благодаря устройству водохранилищ получена возможность поддержания меженного расхода воды у Рублева в 29 (с 97% обеспеченности) вместо минимальных расходов 8—9 м³/сек. до зарегулирования. Основная часть расхода воды забирается для снабжения города.

Для улучшения состояния реки в городе с 1937 г. производится подача воды из канала им. Москвы. В зависимости от ряда причин количество воды, подаваемой из канала, колебалось: в годы войны подача воды была прекращена; в послевоенные годы возобновилась в количестве 25—30 летом и 5 м³/сек. зимой; с июля 1964 г. вода подается круглый год, за исключением периода весеннего половодья, в количестве 30 м³/сек. в р. Москву и 6 м³/сек. через р. Яузу. Начиная с с. Петрово-Дальнее, находящегося в 249 км от устья, река перекрыта девятью невысокими плотинами. Три из них постоянного типа — Рублевская, Карамышевская и Перервинская. Остальные плотины поддерживают уровень только в навигационный период. Карамышевская плотина и все нижележащие имеют судоходные шлюзы. В навигационный период плотины поддерживают постоянный уровень с колебаниями в 10—15 см.

Наличие плотин замедляет скорость перемещения воды, особенно в предплотинных участках. Зимой при открытых плотинах скорость течения составляет 0.3—0.4 м/сек. После закрытия плотин скорость снижается до 0.1 м/сек. в средней части бьефов и до 2—3 см/сек. в предплотинных участках. В условиях замедленного стока происходит выпадение взвешенных веществ и образование донных отложений. При разборных плотинах накопление осадков носит сезонный характер; после снятия щитов, поддерживающих повышенный уровень, создаются условия для промывки русла, которая завершается в весеннее половодье.

Большое влияние на режим реки оказывает забор воды для нужд городского водопровода и спуск промышленных и хозяйственных стоков г. Москвы. Наиболее крупными являются стоки люблинских, курьяновских и люберецких очистных сооружений. Количество городских сточных вод непрерывно возрастает. Общий расход городских сточных вод в 1966 г. составил 33 м³/сек.

Существенные изменения, вносимые регулированием поверхностного стока, не меняют основных черт водоема, типичных для рек Средне-русской возвышенности: высокого расхода в весенний паводочный период и низких расходов в меженные летний и зимний периоды. Четыре водохранилища в верховьях реки снижают расходы во время весеннего поло-

водья, срезая уровень в пределах города примерно на 1.5 м. Тем не менее расходы воды весной во много раз превышают меженные; так, в 1966 г. расходы у Перервинской плотины составляли 700—800 м³/сек.

Данные о расходе воды в реке у Перервы и о количестве организованно спускаемых стоков позволяют вести обработку материалов с учетом не только изменений концентраций соединений, но и количеств ве-

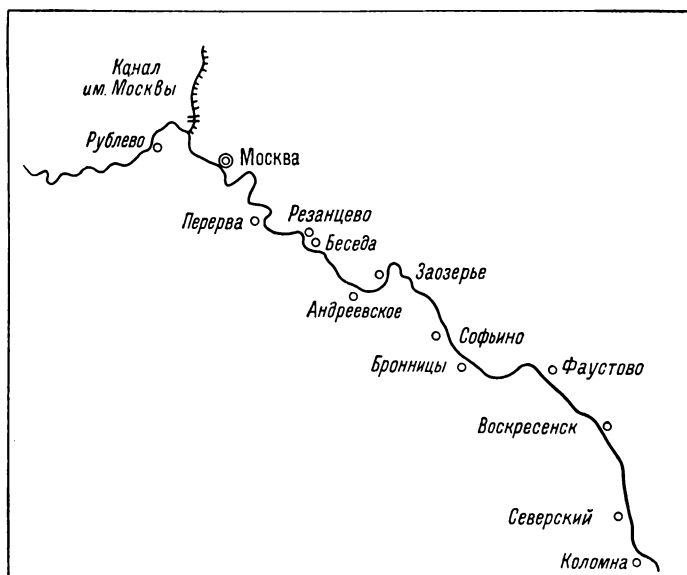


Рис. 1. Схема р. Москвы в нижнем течении.

ществ, проходящих в единицу времени через сечение реки (Бруевич и Аничкова, 1941). Наиболее надежные данные о расходе реки имеются в пункте у Перервинской плотины, где основная масса воды проходит через турбину электростанции. Из-за отсутствия гидрометрических постов на нижележащем участке расход в остальных пунктах наблюдений определен по замерам или по расчету, исходя из площади водосбора и модуля стока.

В дальнейшем изложении будет дана характеристика состояния реки и закономерностей изменения: 1) на участке выше города, где р. Москва представляет типичный водоем средней полосы СССР с измененным гидрологическим режимом; 2) на участке в пределах города, где вода реки заметно изменила природный состав и свойства; 3) на отрезке от места впадения основных стоков г. Москвы до устья ниже Коломны (рис. 1).

КАЧЕСТВО ВОДЫ МОСКВЫ-РЕКИ ВЫШЕ ГОРОДА

Около половины площади водосбора р. Москвы приходится на участок реки выше города. На территории бассейна питания этой части реки природный ландшафт сравнительно мало изменен, территория в основном используется для сельского хозяйства, заметную площадь занимают лесные угодья.

В формировании солевого состава и физических свойств воды основную роль играют природные факторы, обладающие большим постоянством. По мнению Л. С. Берга, гидрологический облик р. Москвы со времени возникновения г. Москвы не изменился. Соответственно постоян-

ными, в пределах определенной амплитуды колебаний, остались состав и свойства воды.

Наиболее существенные изменения в гидрологическом режиме реки внесены строительством плотин на р. Москве у г. Можайска и наиболее крупных левых притоках — Истре и Рузе. Вследствие этого возросли за счет накопленных в водохранилищах внешних вод меженные расходы на отрезке реки вплоть до мест забора воды речными водопроводами г. Москвы.

Несмотря на довольно существенные изменения гидрологического режима, сохранился ритм сезонных изменений жизни реки, основной солевой состав и физические свойства воды. Сохранение природного состава и свойств воды р. Москвы в верхнем течении обусловлено тем обстоятельством, что весь бассейн от истоков до г. Москвы включен в зону санитарной охраны водопровода. Участок реки от г. Звенигорода до г. Красногорска и р. Истра с водохранилищем входят во второй пояс охранной зоны с более строгим режимом, площадь этого пояса составляет 2500 км². Остальная часть бассейна верховьев реки общей площадью в 5000 км², включая Можайское и Рузское водохранилища, входит в третий пояс охранной зоны.

Ограничения в использовании водоема населением и самое главное регулирование размещения промышленных предприятий сдерживали рост загрязнения. Основными источниками загрязнения являются сточные воды городов Можайска, Звенигорода, домов отдыха, санаториев, детских садов. Общий расход стоков, поступающих в реку, составляет в данное время 1.2 м/сек., т. е. 4% от современного меженного расхода воды у Рублева. Загрязнение реки сточными водами носит диффузный характер, т. е. отдельные стоки невелики по объему и места их сбросов обычно разделены значительным расстоянием. Непосредственно в водохранилище сточные воды не поступают. В последние годы в связи с увеличением использования реки и ростом сброса сточных вод явно отмечается ухудшение качества воды по бактериальным показателям. Гораздо труднее обнаружить изменение состава растворенных соединений. В этом отношении отправные точки может дать сравнение современного состава растворенных веществ с данными анализов предыдущих лет, когда река была менее загрязнена. При сравнении современного состава растворенных в воде соединений необходимо учитывать изменения, внесенные повышением роли поверхностного стока в меженный период. В питании реки в среднем 27% составляли подземные источники, 61 давали снеговые воды и 12% дождевые (Быков, 1951). В данное время состав растворенных в воде соединений определяют в основном снеговые воды, накопленные в водохранилищах и там в той или иной степени трансформированные. По своему составу и свойствам вода р. Москвы и ее притоков типична для многих рек Средне-русской возвышенности, в питании которых не играют существенной роли озерно-болотные воды. В связи с отсутствием больших площадей болот и торфяников содержание органического вещества невелико. Цветность воды зимой минимальна (порядка 10—15°), в конце весеннего половодья она повышается, достигая 40°. Среднегодовое значение цветности повышалось в многоводные годы. Величина перманганатной окисляемости равнялась 5—6 мг/л, биохимическое потребление кислорода — обычно 1.5—2.5 мг О₂ за 5 суток.

Общее содержание солей в незагрязненном участке реки в весенний паводочный период составляет 50—70 мг/л. Общий характер солевого состава в паводочный период приблизительно соответствует годовому стоку с некоторыми указанными ниже особенностями. В количественном отношении преобладают катионы кальция и магния и анион угольной кислоты. Относительное содержание НСО₃' весной по сравнению с межнным периодом возрастает.

Происхождение бикарбонатов в паводочной воде в значительной мере должно быть отнесено за счет взаимодействия вод снеготаяния с остатками отмершей растительности и почвенным покровом. Некоторое количество бикарбонатов (25—30 мг/л) содержится в метеорных водах (Бурксер и Федорова, 1955). Повышенное содержание взвешенных почвенных частиц во время паводка в реке (до 100—200 мг/л), возможно, обуславливает переход в воду некоторого количества солей. Данных анализов для расчета содержания одновалентных катионов довольно мало; следует отметить высокое содержание азота аммонийных солей. Незначительные количества хлоридов и сульфатов близки к содержанию данных соединений в метеорных водах.

После весеннего половодья в питании реки усиливалось значение грунтовых вод. По мере повышения температуры воды возрастает влияние биологических процессов как в самой реке, так и в грунтовом потоке. В этот период химический состав и качество речной воды определялись свойствами грунтовых вод, формирующихся на площади водосбора. Наиболее отвечали среднему солевому составу грунтовых вод зимние меженные воды, мало измененные биологическими процессами. После устройства водохранилищ значение грунтовых вод в меженный период значительно снизилось.

Влияние загрязнения бытовыми стоками прежде всего сказывается на газовом режиме; наиболее изучены вопросы влияния на кислородный режим, сравнительно мало данных по изменению содержания углекислоты. Существуют значительные отличия в газовом режиме реки по сезонам; весьма важное значение имеет ледяной покров. Москва-река в верховьях в среднем находится подо льдом четыре месяца. Ледяной покров, постепенно утолщаясь, доходит до 90 см и изолирует реку от атмосферы. В первую очередь это обстоятельство отражается на газовом составе. Углекислота не потребляется фотосинтезирующими организмами, и из-за ледяного покрова не происходит ее удаления в атмосферу. Увеличение концентрации углекислоты позволяет солям кальция и магния удерживаться в растворе, карбонатная жесткость доходит в зимнее время до 6 мг-экв. Зимние месяцы характеризуются понижением концентрации кислорода после осеннего максимума. Как видно из приведенных в табл. 1 средних многолетних величин за 12 лет (Озеров, 1929), зимний минимум по абсолютным значениям близок к летнему.

Т а б л и ц а 1

Содержание растворенного кислорода в воде Москвы-реки (мг/л)

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Кислород	8.6	9.2	9.7	12.1	10.4	9.5	8.6	8.7	9.7	11.6	13.0	11.7

В зимние месяцы вода недонасыщена кислородом, но не столь значительно, как можно было ожидать в связи с преобладающей ролью подземного стока в питании реки. Грунтовые воды сильно обеднены кислородом или вовсе его лишены. Об этом свидетельствует состав почвенного воздуха на участках, занятых растительностью, а также некоторые данные прямых аналитических определений кислорода в грунтовых водах.

Как показали наблюдения, пополнение запасов кислорода р. Москвы зимой происходит за счет притоков реки, имеющих быстрое течение и не покрытых сплошным ледяным покровом (Драчев, 1964). Хотя в верховьях притоки могут быть полностью лишены кислорода, но на участках с открытой поверхностью вследствие повышенной растворимости кислорода

при низких температурах насыщение воды идет весьма энергично. Потери кислорода за счет дыхания гидробионтов при низких температурах незначительны. Важным фактором кислородного режима на некоторых участках р. Москвы служит поступление в реку из водохранилищ придонных вод, обедненных или почти полностью лишенных кислорода во второй половине лета и зимы. В качестве примера можно привести данные по содержанию кислорода на отрезке р. Истры ниже плотины. По зимним наблюдениям, содержание кислорода изменялось следующим образом (табл. 2).

Т а б л и ц а 2
Содержание растворенного кислорода в воде р. Истры
ниже плотины

Место отбора проб	Расстояние от водослива, км	3 III		5 III	
		мг/л	% насыщения	мг/л	% насыщения
У водоспуска . .	0.0	2.9	21.8	3.0	21.5
Бужарово	1.7	7.6	54.9	7.1	42.7
Никулино	6.0	—	—	10.3	72.0

Коэффициент аэрации достигал 26.7 г O_2 /сутки на 1 м² поверхности реки, константа аэрации доходила до 3—6. Таким образом, восстановление нормального кислородного режима в реке ниже плотин происходит весьма интенсивно, и недостаток растворенного кислорода пополняется на протяжении 10—15 км. Аналогичное явление имеет место на р. Москве ниже Можайского водохранилища и р. Рузе ниже плотины. На подступах к городу у Рублева до настоящего времени река сохранила нормальный кислородный режим. Определения содержания кислорода у Рублева в наиболее критический период дали следующие величины (мг/л):

28 II 1964 10.1
29 II 1964 11.1

Определения в другие сезоны года дают величины, близкие к приведенным в табл. 1.

Количество и формы связанного азота в водоеме представляют интерес для оценки состояния водоема, его самоочищающей способности.

Средние данные по р. Москве (рис. 2) являются типичными для чистых рек средней полосы европейской части СССР (Озеров, 1929). В отношении форм минерального азота в Москве-реке на незагрязненном участке отмечается значительное накопление нитратного азота в зимнее время.

Причиной малого содержания нитратов в водоеме летом является потребление их водной растительностью. Повышение количества нитратов зимой обычно объяснялось (Озеров, 1929) поступлением грунтовых вод. Но накопление нитратов происходит и в водоемах озерного типа, почти не имеющих грунтового питания. Значительные количества нитратов образуются зимой в водохранилищах канала им. Москвы, Истринском и др. Определения нитратов и аммония, проведенные в 1964 г. (табл. 2), показали, что колебания в содержании азота находятся в обнаруженных ранее пределах (рис. 2). Таким образом, по содержанию минерального азота и его формам в воде реки выше города за 50-летний период не отмечено заметных изменений.

Для характеристики солевого состава воды выше города у Рублева имеется обширный аналитический материал (Озеров, 1929). Во многих

анализах Рублевской станции за период 1914—1927 гг. имеется систематическая ошибка — сумма Ca^{++} и Mg^{++} при пересчете в мг-экв. превышает сумму анионов. Одним из правильно выполненных анализов, судя по соотношению катионов и анионов, является анализ от 28 II 1917. При сухом остатке в 304 мг и цветности 4° по платино-кобальтовой

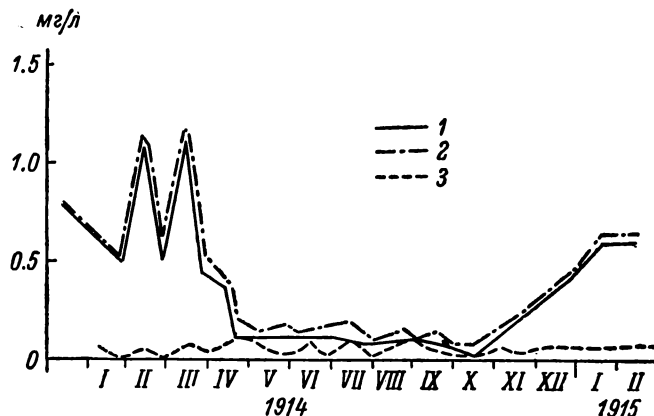


Рис. 2. Формы азота в незагрязненном участке р. Москвы.

1 — азот нитратов; 2 — азот суммарный минеральный; 3 — азот альбуминоидный.

шкале вода содержала 2.9 мг/л хлор-иона, 5.4 мг/л SO_4^{--} и 1.09 мг/л азота нитратов. Расчет состава воды от суммы эквивалентов анионов дает следующие результаты (%):

	Катионы	Анионы
Ca^{++}	71.4	HCO_3' 94.9
Mg^{++}	24.7	SO_4^{--} 2.6
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	3.9	Cl' 1.3
		NO_3' 1.2

Для паводочного периода отвечает поставленному требованию анализ 10 IV 1916 с плотным остатком 67.6 мг и цветностью 50° при содержании хлоридов 0.9, сульфатов 0.9 (SO_4^{--}), азота нитратов 0.16 мг. Процентный состав воды был таков (экв.):

	Катионы	Анионы
Ca^{++}	62.0	HCO_3' 95.3
Mg^{++}	19.6	SO_4^{--} 3.3
$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	18.4	Cl' 2.2
		NO_3' 1.0

Резко увеличено относительное значение одновалентных катионов в паводочной воде при почти полном совпадении состава анионов. Изменение состава катионов в паводочной воде совпадает с увеличением удельного значения одновалентных катионов при действии на образец почвы возрастающих объемов воды (Драчев и Соболев, 1926).

Результаты анализов солевого состава воды р. Москвы выше города в пункте у Рублева, выполненные в 1964—1965 гг., приведены в табл. 3. При сравнении с данными анализов, проведенных около 50 лет назад, можно отметить некоторые изменения. Для меженного периода характерно повышение содержания хлоридов и сульфатов, в катионной части несколько возросло содержание магния.

Для сравнения данных о составе растворенных солей приведем результаты анализов, взятых в период зимних меженьей 28 II 1917 и 28 II 1964. Состав катионов (%экв.):

	NH_4^+	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	Mg^{++}	Ca^{++}
28 II 1917	—	3.9	24.7	71.4
28 II 1964	0.26	1.30 4.20	30.5	63.7

Для более позднего анализа характерно повышенное содержание магния и одновалентных катионов, за счет чего снизилось относительное содержание кальция. Изменения состава катионов, возможно, до некоторой степени связаны с более низким солевым составом пробы, взятой в 1964 г.; сухой остаток пробы составил 273 в 1964 г. и 304 мг/л в 1917 г. В данное время как зимние, так и летние меженные воды р. Москвы менее минерализованы за счет поступления вод из водохранилищ в верховьях р. Москвы.

Состав анионной части растворенных солей в процентах эквивалентов характеризуется следующим образом:

	HCO_3^-	SO_4^{--}	Cl^-	NO_3^-
28 II 1917	93.5	3.3	2.2	1.0
28 II 1964	86.6	5.4	6.7	1.4

По данным современного анализа, отмечено повышение анионов сильных кислот, особенно хлор-иона. Соответственно на 7% уменьшилась доля бикарбонатного иона. Данные о составе анионов согласуются с изменением характера природных вод под влиянием бытовых стоков.

На состав и свойства р. Москвы у города оказывает влияние регулярное поступление воды из канала им. Москвы, подаваемой в количестве, в 4 раза превышающем меженный расход реки в природных условиях. Данные о содержании растворенных в воде канала солей приведены в табл. 3. Как видно, в зимний меженный период воды канала отличаются от вод р. Москвы повышенным содержанием хлор- и сульфат-ионов. По данным наблюдений в 1946—1950 гг., содержание хлор- и сульфат-ионов в среднем составляло 3.0 и 6.0 мг/л, причем максимальные количества не превышали 13.0 мг/л для Cl^- и 17.2 для SO_4^{--} (Драчев, 1956). Наиболее вероятной причиной повышения содержания хлор- и сульфат-иона в воде канала является сброс сточных вод г. Калинина в р. Волгу, водами которой в основном питается канал. Это предположение согласуется с обнаружением в воде канала небольших количеств меди, содержание которой характерно для промышленных стоков г. Калинина. Особенности состава воды канала видны из следующих данных о составе катионов (%экв.):

	NH_4^+	K^+	Na^+	Mg^{++}	Ca^{++}
28 II 1964	0.4	1.6	3.8	18.9	69.3

В составе анионов повышено содержание хлор- и особенно сульфат-ионов (%):

	HCO_3^-	SO_4^{--}	Cl^-	NO_3^-
28 II 1964	74.1	14.4	9.6	1.9

По сравнению с р. Москвой почти в 3 раза повышено содержание сульфатного аниона и в 1.5 раза хлор-иона. Основной источник загрязнения канала — сточные воды г. Калинина — удалены на расстояние около 200 км и продвижение их замедлено Иваньковским и водораздельными водохранилищами.

Содержание растворенных солей в воде р. Москвы выше города и канала им. Москвы между 7-м и 8-м плёзами (мг/л)

Пункт наблюдений	Дата	Катионы					Анионы				
		NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	HCO ₃ [']	Cl [']	SO ₄ [']	NO ₂ [']	NO ₃ [']
Рублево	28 II 1964	0.20	2.8	5.3	20.29	69.74	262.3	11.4	12.75	—	0.95
	29 II 1964	0.20	2.4	5.8	15.67	65.53	280.6	11.4	11.72	—	0.88
	2 III 1964	0.20	2.5	6.5	15.31	67.74	280.6	11.4	11.73	—	1.80
	4 IX 1964	0.05	2.6	5.8	13.61	43.69	195.4	6.1	—	0.002	—
	5 IX 1964	0.04	2.1	5.4	13.24	43.28	195.2	6.1	—	0.002	0.05
	7 IX 1964	0.06	2.7	5.4	13.85	43.69	194.0	6.2	—	0.002	—
	15 VI 1965	—	—	—	—	28.13	101.2	11.5	—	—	—
Выше Пушкина	28 II 1964	0.25	2.8	9.9	10.08	60.92	225.7	17.0	34.56	—	1.30
	29 II 1964	0.28	2.5	10.0	10.33	58.72	231.8	14.2	48.96	—	2.50
	2 III 1964	0.23	3.0	12.5	13.00	78.56	231.8	17.0	44.85	—	—
	4 IX 1964	0.15	1.9	7.0	9.96	29.46	141.5	5.2	18.71	0.005	—
Канал им. Москвы	5 IX 1964	0.14	1.8	6.3	8.14	30.26	133.0	4.9	—	0.005	0.12
	7 IX 1964	0.18	1.9	7.2	9.00	30.66	138.5	4.9	—	0.004	—
	3 VII 1965	—	2.2	6.7	—	—	65.7	10.2	—	—	—

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ ВОДЫ Р. МОСКВЫ В ПРЕДЕЛАХ ГОРОДА

От Рублева (232 км от устья) до Перервинской плотины р. Москва на протяжении 72 км пересекает территорию г. Москвы. На этом участке, составляющем 14.3% общей протяженности, река принимает свыше 30 притоков, из которых наиболее значительными являются Яуза и Сетунь. Уровень реки регулируется двумя постоянными плотинами — Карамышевской и Перервинской, построенными в 1935—1936 гг. До устройства плотин на р. Москве и ее притоках средний меженный расход воды у бывшей Бабьегородской плотины снижался зимой до 8.2, летом до 7.7 м³/сек.

В данное время режим реки на городском участке изменен поступлением воды из канала им. Москвы. С 1964 г. установлена круглогодичная подача воды. Добавки не производятся только в весеннее половодье. В меженный период количество воды, подаваемой из канала, в 4—5 раз превышает природный меженный расход р. Москвы. Следовательно, в питании р. Москвы преобладающее значение имеют воды Верхней Волги, в некоторой степени трансформированные при прохождении по каналу и водохранилищам водораздельного бьефа.

Притоки р. Москвы, впадающие в черте города, незначительны по расходу, но вносят в реку много загрязнений. До устройства канализации Яуза и особенно Неглинка широко использовались для спуска нечистот и были значительно более загрязнены, чем в данное время (Лушхин, 1947). Одним из наиболее загрязненных притоков является р. Яуза, в верховья которой сбрасывают бытовые и промышленные стоки г. Мытищи. Общее количество сточных вод, поступающих в р. Яузу и ее притоки, исчисляется в 0.58 м³/сек., что составляет около половины природного расхода реки. Так как сточные воды поступают в реку неочищенными, состояние реки остается совершенно неудовлетворительным, несмотря на поступление 6 м³/сек. чистой воды из канала им. Москвы. Значительное загрязнение в р. Москву вносит левый приток — Нищенка, в воды которой сбрасываются отходы десятков предприятий. Промышленные сбросы оказывают большое влияние на состав и свойства воды в пределах города.

Общее количество промышленных сточных вод города, поступающих непосредственно или после недостаточной очистки в р. Москву, исчислялось в 1965 г. 300 000 м³/сутки. Неучтенными, но заслуживающими внимания и исследования являются донные отложения реки и поверхностный сток с территории города, составляющей 870 км². В образовании донных отложений решающее значение имеет Перервинская плотина, создающая подпор на всем протяжении реки вплоть до Карамышева. Роль донных отложений возрастает по мере приближения к плотине и становится особо заметной в акватории южного речного порта.

Поверхностные стоки с городских территорий по некоторым признакам приближаются к бытовым сточным водам (Шигорин, 1956, 1963; Квитницкая, 1959). Работ по количественному учету поверхностных стоков г. Москвы не проводилось и расчетных данных нет. Проведение работ в этом направлении представляется необходимым для освещения вопроса и разработки оздоровительных мероприятий.

На территории города имеются четыре малые городские очистные станции, где воды проходят полную биологическую очистку. Суммарная мощность местных станций 145 000 м³/сутки, что составляет 5% от количества сточных вод, поступающих в городскую сеть. Значение этого источника загрязнения в отношении органического вещества и кислородного режима невелико, но загрязнение их бактериями весьма значительно.

В силу множественности источников загрязнения выяснение их характера и относительного значения представляет сложную задачу. В связи с важностью сохранения реки как составной части городского облика в удовлетворительном состоянии лаборатории Бассейнового управления и санитарной инспекции проводят систематические анализы проб воды. Обработка аналитических материалов должна дать не только обоснования для практических мероприятий по оздоровлению реки (Трахтман и Скидальская, 1956), но и послужить материалом для обобщений в отношении процессов самоочищения в реке, находящейся в необычных условиях.

Действие всех положительных и отрицательных факторов, влияющих на реку в черте города, суммируется при выходе из города у Перервинской плотины. Места сбросов трех крупных очистных сооружений — Курьяновской, Люблинской и Люберецкой станций биологической очистки — расположены ниже плотины.

Для характеристики состояния реки при выходе из города мы располагаем данными посезонных анализов 1946—1948 и 1964—1966 гг. Наличие гидрометрических данных позволяет рассчитать расходы вещества в реке за единицу времени.

Данные табл. 4 характеризуют состояние реки у Перервинской плотины в 1946 и 1964 гг. По последним наблюдениям, в воде возросло содержание аммонийного азота и хлор-иона, несмотря на увеличение расходов воды.

Т а б л и ц а 4

Сезонные колебания состава воды Москвы-реки у Перервы 1946 и 1964—1965 гг.

Сезон, год	число проб	рН	Щелочность, мг-экв./л	Азот, мг/л		Cl', мг/л	Растворен- ный кисло- род, мг/л	% насыще- ния кисло- родом	БПК ₅ , мг O ₂	Расход воды, м ³ /сек.
				аммоний- ный	нитратов					
Лето 1946	7	7.59	3.25	2.2	0.30	28.2	4.5	44	4.3	33
Осень 1946	6	7.58	3.49	2.0	0.67	28.1	8.4	62	4.1	33
Зима 1947	5	7.35	4.53	4.9	0.60	41.5	3.0	21	7.2	18
Лето 1965	4	7.03	2.85	3.9	—	42.0	1.1	14	6.2	55.5
Осень 1964	4	7.12	2.82	2.6	1.70	35.0	4.5	38	—	55.0
Зима 1964	3	7.10	3.80	7.3	0.50	87.0	0.8	6	14.0	25.0

Наиболее показательным признаком ухудшения состояния реки является снижение содержания кислорода. Осенью 1964 г. кислорода было почти вдвое меньше, чем в тот же сезон 1946 г. Летом и зимой река находилась на грани анаэробнозиса. Данные по кислородному режиму реки у Перервинской плотины согласуются с высоким потреблением кислорода, которое в 1965 г. было значительно выше, чем в непосредственно послевоенные годы.

Наименьшее количество аммонийного азота обнаружено в осенних пробах, как это было отмечено и в 1946 г. Одной из причин этого явления

может быть более ограниченное влияние донных отложений в осенний период, когда в воде присутствует кислород в заметных количествах. Известно, что поступление аммонийного азота из донных отложений

Т а б л и ц а 5
Расход отдельных соединений
по сезонам в 1946 и 1964 гг.
(т/сутки)

Соединения	1946	1964
Лето		
Азот аммонийный . .	6.3	18.7
Хлориды	80.4	201.4
Растворенный кис-		
лород	12.8	5.3
БПК ₅ в O ₂	12.3	29.8
Осень		
Азот аммонийный . .	5.7	12.3
Хлориды	80.1	166.3
Растворенный кис-		
лород	24.1	21.4
БПК ₅ в O ₂	11.6	—
Зима		
Азот аммонийный . .	7.6	15.7
Хлориды	64.5	187.9
Растворенный кис-		
лород	4.7	1.7
БПК ₅ в O ₂	11.2	30.4

происходит наиболее интенсивно в анаэробных условиях. В отношении хлоридов отмечены большие колебания, возможно, объяснимые изменениями дебитов реки и промышленных сбросов.

На основании анализов и гидрометрических данных были произведены расчеты расхода отдельных компонентов в створе у Перервинской плотины. Сведения о расходе воды в период обследований получены от Управления канала им. Москвы. Данные о расходах рассчитываются по количеству воды, проходящей через турбину гидроэлектростанции и расходуемой на шлюзование. Данные табл. 5 указывают, что за истекшие два десятилетия произошло значительное увеличение ряда соединений, кроме растворенного кислорода. Более чем в 2 раза возросло количество аммонийного азота — основного показателя хозяйственно-фекального загрязнения. В какой мере увеличение отвечает возросшему количеству сточных вод, вызванному ростом населения, или действию других причин, сказать трудно. Не исключено возросшее влияние донных отложений или смыва со значительно расширившейся территории города.

Количество хлора, сбрасываемого в основном промышленностью, увеличилось в 2—3 раза (табл. 5). При обследовании, проведенном летом 1966 г., в реке у Перервы найдено 34.5 натрия и 7.5 мг/л калия. Отношение натрия к калию было близко к найденному в сточных водах г. Москвы (мг/л):

Сбросы станций очистки	Натрий	Калий
Курьяново	80.6	14.5
Люблино	122.5	15.0
Люберцы	74.4	15.0

Отношения эти значительно отличаются от данных, полученных для чистых речных вод и для ряда промышленных стоков. Абсолютные расходы у Перервы составили 36 калия и 165 т/сутки натрия. Из сопоставления с содержанием хлоридов следует, что часть щелочных металлов связана с сульфатами. Количество сульфатов ниже города по сравнению с незагрязненными участками реки резко возросло. В повышении содержания сульфатного иона основную роль играют промышленные сбросы.

Промышленные сбросы повышают содержание в воде реки меди, никеля, свинца, молибдена, серебра. По данным Г. В. Кольцова (1968), содержание названных металлов в воде у Перервинской плотины было наибольшим по сравнению с нижележащими пунктами наблюдений.

Даже в пункте, расположенном ниже впадения всех стоков города, концентрация большинства элементов была ниже, чем непосредственно при выходе реки из города.

Содержание органического вещества по БПК₅ возросло за истекшие годы (1946—1965) почти в 2,5 раза. Увеличение количества легко окисляемого органического вещества наряду с возрастанием примерно в той же пропорции аммонийного азота указывает на увеличение сбросов бытового характера или на возрастание загрязнения вторичного порядка через донные отложения. Одной из причин ухудшения кислородного баланса реки является увеличение сбросов в реку неочищенных сточных вод. В 1945 г. в среднем за сутки сбрасывалось 38 000, в 1965 г. количество их возрастало до 201 000 м³. При величине БПК₅ 180 мг/л суточный сброс составит 36 т легко окисляемого органического вещества. Малые городские очистные сооружения сбрасывали в р. Москву 145 000 м³, при величине БПК₅ очищенных вод в среднем 10 мг/л, что составляет 1.45 т/сутки органического вещества. Весьма приблизительно может быть рассчитано количество органических загрязнений, поступающих в реку с территории города. Принимая, что загрязнения, вносимые поверхностным стоком города, составляют 15% от загрязнений бытовыми стоками (Правошинский, 1965), и допуская, что последняя величина в г. Москве составит 300 т/сутки, получаем величину нагрузки на реку от поверхностного стока 45 т/сутки. При выходе из города у Перервы суточный расход органического вещества по БПК₅ 30 т/сутки. Таким образом, самоочищающая способность реки в пределах города составляет несколько десятков (не менее 50) тонн в сутки органического вещества. Последняя величина является минимальной, так как не учтены влияние донных отложений и продукция органического вещества за счет фотосинтеза водной растительностью.

СОСТАВ И СВОЙСТВА ВОДЫ Р. МОСКВЫ НИЖЕ ГОРОДСКИХ СТОКОВ В ПУНКТАХ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ

Первыми очистными сооружениями города были поля орошения вблизи сел Люберцы и Люблино, пущенные в эксплуатацию в конце прошлого столетия. Стоки люблинских полей орошения и прудов поступали в р. Москву у Чагина, стоки люберецких полей орошения сбрасывались в р. Пехорку, левый приток р. Москвы. Поля орошения, поля фильтрации и биологические пруды давали весьма высокий эффект очистки, но вместе с тем положили начало глубоким изменениям солевого состава и содержания основных биогенных элементов на участке реки ниже города (Калашникова, 1913; Обзор. . ., 1928).

Одним из весьма чувствительных показателей загрязнения бытовыми стоками является растворенный кислород. По исследованиям, проведенным 80 лет назад, снижение растворенного кислорода ниже города отмечено до строительства общегородской канализации. М. Б. Коцин (1889) показал, что в летнее и зимнее время содержание кислорода в воде реки ниже города было несколько пониженным. Содержание растворенного кислорода составляло (мг/л):

	В январе	В среднем за лето
Лохино (выше города)	6.23	8.96
Шелепиха (в городе)	6.69	8.52
Чагино (ниже города)	5.33	6.97

По мере увеличения количества сточных вод и перехода к приемам искусственной биологической очистки влияние стоков города на состав и

свойства речной воды возрастало. Если до строительства канализации содержание аммонийного азота ниже города повышалось на десятки доли мг/л, то после пуска очистных сооружений в реке обнаружилось несколько миллиграммов аммония в 1 л.

В качестве приема улучшения состояния реки с 1937 г. был увеличен дебит за счет добавки воды из канала им. Москвы. В исследованиях В. Н. Кононова и С. Т. Ситнова (1939) отмечено улучшение качества воды в реке под влиянием этого приема в пределах города. Однако, по данным Н. К. Дексбаха и А. Я. Мусатовой (1940), эффект добавки воды был отмечен только на участке реки вблизи места сброса чистых вод.

Трудные условия создались на р. Москве ниже города в военные и непосредственно послевоенные годы. Были задержаны строительство и ввод в эксплуатацию очистных сооружений и городских коллекторов, сокращена подача воды из канала им. Москвы; в зимнее время подача вовсе не производилась.

В дальнейшем были введены мощные очистные сооружения Курьяновской и Люблинской, а в последующем Люберецкой станций с полной биологической очисткой (1965 г.), что нашло отражение в состоянии реки. Обширный аналитический материал исследований 1945—1948 и 1964—1966 гг. характеризует состояние реки в пункте полного перемешивания.

В период 1945—1948 гг. сбросы очищенных сточных вод ниже города составляли 8—9 м³/сек., основная масса стоков поступала с люблинских очистных сооружений выше Бесединской плотины. На участке реки выше плотины отмечена неоднородность состава воды по разрезу. Перепад воды способствует смешению, и на участке ниже Бесединской плотины река практически однородна в поперечном сечении. Относительно небольшая часть стоков с люберецких очистных сооружений не вносила существенных изменений в режим реки. В 1965 г. после ввода в эксплуатацию очистных сооружений у Люберец мощностью 1 млн м³/сутки положение существенно изменилось. Сброс сточных вод ниже Заозерья создает струйность по поперечному сечению, река становится однородной по разрезу после плотины у Софьиной. Таким образом, для учета влияния всех городских сточных вод приходится сравнивать данные первого периода обследований ниже Бесединской плотины и последующего ниже Софьиной плотины.

Средние данные о составе воды у Бесединской плотины по сезонам в 1947—1948 гг. приведены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Средние данные о составе воды у Беседы по сезонам

Сезон, год	Число проб	Температура воздуха, °C	Аммонийный азот, мг/л	Cl', мг/л	Растворенный кислород, мг/л	БПК ₅ , мг O ₂ /л
Лето 1947	33	21.4	6.2	36.0	4.8	10.7
1948	12	21.4	7.4	54.2	4.1	10.3
Осень 1947	28	8.4	7.0	49.0	7.2	19.6
1948	12	9.4	7.5	54.0	6.8	8.9
Зима 1947	20	0.4	8.6	53.0	4.9	23.9
1948	12	0.7	10.2	64.0	5.2	24.9

Результаты анализов двух послевоенных лет по БПК₅ и растворенному кислороду выражались близкими величинами. Содержание аммония и хлор-иона в 1948 г. заметно увеличилось. Несмотря на высокое значение

БПК₅, в воде всегда содержался растворенный кислород. Процент насыщения кислородом был наибольшим осенью (57—72), наименьший зимой (34—36). Сравнительно благоприятный кислородный режим осенью и летом объясняется в значительной степени насыщением кислородом при движении воды от Перервы и перепаде через Бесединскую плотину. В пункте, находящемся в нескольких километрах выше Бесединской плотины у Резанцева, по данным трехлетних наблюдений (рис. 3), отмечается летний минимум содержания кислорода. Снижение кислорода зимой после осеннего максимума было выражено не столь резко. Как будет показано ниже, в конечном пункте наблюдений у г. Коломны кислородный режим по сезонам полностью отличается от представленного на рис. 3.

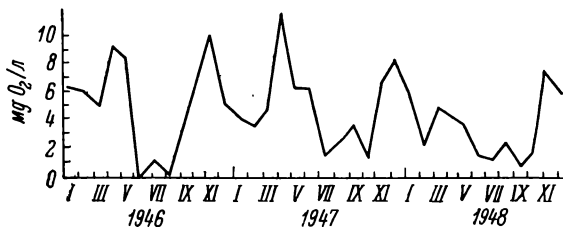


Рис. 3. Содержание растворенного кислорода в р. Москве у Резанцева.

При рассмотрении кислородного режима вблизи места впадения в реку сточных вод, прошедших полную очистку, следует принимать во внимание содержание кислорода в самих стоках, обычно колеблющееся в пределах 5—6 мг/л кислорода. Величина БПК₅ в реке в 1946—1948 гг. необычайно высока, особенно в зимний период. Объяснение причин этого явления указывалось выше.

Через 18 лет, после обследования реки в послевоенные годы, произошли существенные изменения на площади водосбора и в режиме реки. Население города увеличилось на 2 млн, расход сточных вод, сбрасываемых в реку, возрос более чем в 3 раза (с 9 до 30 м³/сек.).

Для сравнения состояния реки ниже сброса сточных вод города приводим данные обследования 1964—1965 гг. (табл. 7).

Т а б л и ц а 7

Средние данные о составе воды ниже Софьиной плотины по сезонам в 1964—1965 гг.

Дата	Число проб	Температура воды, °С	Аммонийный азот, мг/л	Cl', мг/л	Растворенный кислород, мг/л	БПК ₅ , мг O ₂ /л
Март 1964	3	0.1	7.0	123.4	2.6	14.0
Октябрь 1964	3	11.3	7.2	63.5	8.2	7.7
Июнь 1965	3	19.8	5.8	77.0	5.5	8.2

При оценке состояния реки по сезонам необходимо иметь в виду, что зимой 1964 г. добавка воды из канала составляла 1.8 м³/сек. и расход воды у Перервинской плотины в период наблюдений (март) доходил до 27.1 м³/сек. Указанное обстоятельство объясняет наибольшую из опубликованных данных по р. Москве концентрацию хлор-иона (123.4 мг/л). Несмотря на резкое увеличение концентрации хлоридов в зимний период по сравнению с данными табл. 6, величина потребления кислорода почти вдвое ниже. В воде содержалось 2.6 мг/л кислорода, тогда как в предыдущие годы в марте у Софьины запасы растворенного кислорода были почти исчерпаны. Летом и осенью при значительной

добавке воды из канала резко снижалось содержание хлор-иона. Несмотря на увеличение сброса сточных вод, величины БПК₅ были значительно ниже, чем в 1946—1947 гг.

Таким образом, несмотря на увеличение объема сточных вод, химические показатели загрязнения дают более благоприятную картину состояния реки, чем прошлые исследования.

Т а б л и ц а 8

Суточный расход хлор-иона
у Беседы в 1946—1948 гг.
(т/сутки)

Сезон	Годы			
	1946	1947	1948	1949
Лето . .	—	154	232	—
Осень .	155	167	184	—
Зима . .	—	155	213	196

Об абсолютных количествах веществ, вносимых в реку со стоками, дают представления расчеты, сделанные на основании средних данных о содержании отдельных ингредиентов в реке и расходах воды. В табл. 8 приведены данные о суточном расходе хлор-иона ниже сброса сточных вод города в послевоенные годы.

Учитывая значительные отличия в гидрологических условиях и возможные колебания сбросов промышленного хлора, можно считать, что полученные данные дают довольно постоянные цифры в пределах 150—230 т/сутки. Из этого количества около 10% должно быть отнесено за счет естественного расхода незагрязненной реки. Бытовое потребление в городе с населением 4 млн составляет 40 т хлор-иона в сутки, в 3—4 раза более дает промышленность.

Расходы хлор-иона у Софьинской плотины составили (т/сутки):

Зима 1964 г.	Осень 1964 г.	Лето 1965 г.
604	527	552

Относя 5% хлор-иона за счет незагрязненной воды и 10% за счет населения города (6 млн), получаем сбросы 450—500 т промышленного хлор-иона. По сравнению с предыдущими исследованиями отношение бытового хлора к промышленному возросло до 1 : 9 (вместо 1 : 3.5), т. е. расход промышленного хлора возрос примерно в 3 раза.

Под влиянием сбросов сточных вод произошли изменения в составе анионов (табл. 9).

Содержание сульфат-иона было примерно равным количеству хлор-иона.

Преобладающее значение имеют бытовые стоки в отношении аммонийного иона, образующегося в большом количестве после гидролиза мочевины и составляющего 12.5% от состава катионов мочи.

Подсчеты количеств аммонийного азота в пункте полного перемешивания (ниже Беседы) приведены в табл. 10.

Обращает внимание большая выравненность полученных данных для лета и осени. В 1947 г. расходы во все сезоны года были близки, в 1948—1949 гг. зимние расходы азота были значительно выше.

При обследовании в 1964—1965 гг. расход азота в реке ниже сброса всех стоков г. Москвы (у Софьины) составил (т/сутки):

Зима	Лето	Осень
62.6	38.7	57.3

Т а б л и ц а 9

Содержание анионов в речной воде
у Софьины летом 1965 г. (мг/л)

Дата	НСО ₃	Cl'	SO ₄ '
16 VI	206.5	79.0	72.0
18 VI	203.8	82.9	72.0
2 VII	201.4	69.4	69.6

Вновь обращает внимание более высокое поступление аммонийного азота зимой, чем летом, что, возможно, связано с уменьшением численности городского населения в летний период.

Суточное поступление аммонийного азота в канализацию от одного человека принимается равным 6—10 г. В 1946—1949 гг. при населении города в 4 млн минимальная норма соответствует 24 т/сутки азота. Как видно из табл. 10, величина эта была превзойдена только в зимние месяцы. По другим сезонам года расчетная величина довольно близко подходила к полученным осенью и летом 1947 и 1948 гг.

По данным 1964—1965 гг., фактически найденный расход азота летом был близок к минимальной, а осенью и зимой к максимальной суточной норме азота (10 г/сутки), что соответствует 60 т/сутки при 6 млн населения города.

С. Н. Строганов (1923) показал, что содержание азота в канализационной воде тесно связано с режимом питания населения. Представляется вероятным, что возрастание суточного расхода азота в реке объясняется улучшением питания населения. Сравнительная устойчивость полученных данных позволяет подойти к расчету и количественному выражению изменения природного режима водоемов под влиянием сбросов бытовых сточных вод. Наблюдения и подсчеты за ряд лет показывают, что содержание одного из важнейших биогенных элементов — азота — возрастает в водоеме пропорционально числу жителей, пользующихся канализацией.

По величине биохимической потребности в кислороде за пять суток может быть рассчитано количество органического, легко окисляемого вещества. В табл. 11 приведены данные о расходе органического вещества по сезонам ниже Бесединской плотины.

Амплитуда колебаний по годам и сезонам в отношении органического вещества находится в пределах от 30 до 95 т, значительно превышая расходования по количеству ионов аммония и хлора. Основными причинами

этого являлись изменения в работе очистных сооружений и процессах самоочищения реки. По данным за 1947 и 1948 гг., зимой величина БПК₅ была вдвое выше, чем летом. Количество органического вещества зимой 1947 г. составило 95 т/сутки, летом 45.8; для следующего года наблюдений соответственно 95.2 и 37.1 т/сутки.

Следует указать на повышенную концентрацию сточной жидкости г. Москвы в зимний период, что впервые отмечено в обзоре работ люблинских полей фильтрации.

По данным четырехлетних наблюдений установлено, что летом средняя величина окисляемости была 53.6 мг/л, БПК₅ 310, зимой же величина окисляемости 70.8 мг/л, БПК₅ 430, т. е. на 34% выше, чем летом. Содержание взвешенных веществ летом 410.6, зимой 498.0 мг/л — разница почти на 20%. Последующие наблюдения на Кожуховской станции аэрации подтвердили эти наблюдения. Следовательно, в зимнее время как

Т а б л и ц а 10

Суточные расходы аммонийного азота у Беседы (т)

Сезон	Годы			
	1946	1947	1948	1949
Лето . .	—	21.5	21.6	—
Осень . .	22.5	22.1	23.9	—
Зима . .	—	19.0	34.4	32.5

Т а б л и ц а 11

Расход органического вещества ниже основных стоков по БПК₅ (т/сутки)

Сезон	Годы			
	1946	1947	1948	1949
Лето . .	—	45.8	37.1	—
Осень . .	61.0	65.0	30.0	—
Зима . .	—	95.0	95.2	76.5

очистные сооружения, так и водоемы получают более высокую нагрузку, чем летом.

В литературе отмечено ухудшение работы очистных сооружений зимой. По данным Н. А. Базякиной (1948), полезная окислительная мощность биофильтров зимой заметно ниже для аэрофильтров, и особенно для перколяторов.

Насколько ухудшается работа очистных сооружений в зимний период, можно видеть из данных Н. М. Поповой (1959). В среднем за три года (1946—1948) очистные сооружения зимой давали стоки, содержащие почти вдвое более органического вещества (по БПК₅), чем летом.

В 1964—1965 гг. расход органического вещества ниже всех стоков города составил (т/сутки):

Зима	Лето	Осень
74.8	70.6	63.9

По данным обследований 1964—1965 гг., содержание органического вещества у Софьино было несколько менее, чем зимой в 1947—1949 гг., и близко к отмеченному осенью в 1946 и 1947 гг.

Т а б л и ц а 12

Содержание фосфора в воде реки ниже впадения стоков города летом 1965 г. (мг/л)

Дата	Фосфор общий	Минеральный	Органический
16 VI	0.65	0.40	0.25
18 VI	0.60	0.30	0.30
2 VII	0.63	0.25	0.38

Принимая суточную норму поступления в канализацию от одного жителя в 50 г/сутки по БПК₅, получаем общую величину для 1947 г. 200, для 1964 г. 300 т органического вещества. Таким образом, если в первый период обследования в реке обнаружено до 48%, то в 1964—1965 гг. максимальная нагрузка на реку не достигала 25% от расчетных величин.

При исследовании реки в 1964—1965 гг. было определено содержание минерального и общего фосфора на загрязненном участке реки ниже города. В табл. 12 приведены данные по содержанию фосфора ниже впадения всех стоков в летний период.

По сравнению с незагрязненным участком реки содержание общего фосфора возросло на один порядок. Примерно такие же результаты получены для зимнего и осеннего периодов. Пересчеты на суточный расход фосфора дают величины (т):

Зима	Лето	Осень
4.4	5.4	5.8

Принимая величину суточного поступления фосфора в канализацию 0.73 г на одного жителя, получаем общий расход фосфора порядка 4.4 т/сутки. Величина эта совпадает с обнаруженной в реке зимой и заметно ниже данных, полученных летом и осенью. Так как часть фосфора удаляется при очистке сточных вод вместе с осадком, надо полагать, что имеются другие источники поступления фосфора.

Определение содержания щелочных металлов (Кобякова, 1968) в створе у Софьинской плотины дало возможность сопоставить сезонные колебания концентрации этих элементов и рассчитать суточные расходы (табл. 13).

С хозяйственно-фекальными сточными водами в реку поступает 15 т калия и 30 т натрия. В 4 раза большие количества калия и в 10 раз большие количества натрия, обнаруженные в реке, должны быть отнесены за счет промышленных сбросов.

Приведенные данные суммарных расходов некоторых ингредиентов солевого состава и биогенных элементов в общем довольно устойчивы и могут служить материалом для прогнозов изменений состава воды при сбросах городских сточных вод. В отношении азота можно принимать норму 8 г/сутки на одного жителя. Приблизительно 0.8 г/сутки фосфора в расчете на душу населения найдено в реке ниже городских стоков. Представляется интересным сопоставить наши данные с исследованиями на реках, протекающих через другие крупные города.

Т а б л и ц а 13

Содержание и расход щелочных металлов
у Софьинской плотины

Дата	Калий		Натрий	
	мг/л	т/сутки	мг/л	т/сутки
6—8 III 1964	13.0	67.3	62.0	321.1
9 и 17 X 1964	9.3	67.2	47.5	343.4
16 VI и 2 VII 1965	9.31	66.6	47.3	339.1

Изменения солевого состава под влиянием сбросов городских и промышленных вод сводятся к увеличению в катионной части калия, и особенно натрия, главным образом за счет снижения кальция. В анионной части повышается относительное содержание хлор- и сульфат-иона за счет снижения бикарбонатного. Для карбонатно-кальциевых вод эта закономерность имеет общее значение.

ПРЕВРАЩЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В РЕКЕ ЛЕТОМ

В летних условиях мощным фактором превращения вещества и энергии в водоеме является деятельность гидробионтов. Пути количественного исследования роли водных организмов в процессах самоочищения освещены в работе Г. Г. Винберга (1964). Явление евтрофикации водоема под действием бытовых и промышленных стоков и изменения состава гидробионтов изучались на озерах в Швейцарии (Hasler, 1947), ФРГ (Thienemann, 1955; Ohle, 1965), США (Edmondson, 1961; Davis, 1964; Carr a. Hiltunen, 1965). Замедление течения в предплотинных участках р. Москвы создает условия, до некоторой степени приближающиеся к прудовым.

Р. Москва является удобным объектом исследований процессов превращения вещества в том отношении, что стоки г. Москвы представляют сосредоточенное и массивное загрязнение. Ниже ближайшей плотины стоки однородно перемешиваются с речной водой. Дальнейшие изменения состава и свойств воды в основном должны быть отнесены за счет процессов, идущих в реке, так как других источников загрязнения, сопоставимых по масштабу со стоками города, не имеется на всем протяжении реки. До пуска Люберецкой станции аэрации участок реки, удобный для изучения процессов самоочищения, от Беседы до устья имел протяженность 140 км, в 1964 г. сократился до 90 км (от Софьины до устья).

Некоторое осложнение в режим реки вносят загрязненные притоки — р. Пахра с площадью водосбора 2614 км² и р. Пехорка, принимавшая ранее сбросы люберецких полей орошения, но относительное влияние этих притоков невелико. Данные об изменении некоторых основных показателей качества воды на участке от Беседы до Коломны летом 1948 г. приведены в табл. 15.

По средним данным за сезон отмечено улучшение кислородного режима от места полного перемешивания у Беседы до устья; процент насыщения кислородом с 46 возрастает до 98 к Коломне. По течению реки происходит некоторое снижение содержания хлор-иона и аммонийного азота. На

протяжении участка реки отмечено небольшое снижение перманганатной окисляемости. Другие важные показатели состояния реки — биохимическое потребление кислорода, содержание взвешенных веществ и прозрачность — не дают картины постепенного снижения от места наибольшего загрязнения к конечному пункту наблюдений.

Довольно высокая для реки величина БПК₅ оказалась практически стабильной на расстоянии 30 км от Беседы до Заозерья. К пункту Софьино, расположенному в 50 км от исходного места наблюдений, происходит повышение величины БПК₅ в 1.4 раза от исходной величины. В дальнейшем у Бронниц БПК₅ снизилось, но лишь к конечному пункту наблюдений, в 140 км от Беседы, величина эта снизилась на 25% от исходной. По расчетам М. Г. Рябышева (1964), перемещение водной массы на этом отрезке реки занимало 9 суток. При обычной скорости распада органического вещества (константа 0.1) к Коломне величина БПК₅ в реке должна составить лишь 13% от БПК₅, обнаруженного в исходном месте наблюдений. В пункте у Софьино и особенно у Бронниц установлено повышение взвешенных веществ, что, возможно, стоит в некоторой связи с повышением БПК₅.

Одним из основных показателей состояния водоема является величина биохимического потребления кислорода, поэтому в табл. 15 приведены данные об изменении БПК₅ по каждому из летних месяцев 1948 г.

По среднемесячным данным, у Софьино, расположенного на расстоянии 50 км от места сброса основной массы городских сточных вод, величина БПК₅ была выше, чем в пункте полного перемешивания стоков. Явление это особенно было выражено в июне у Софьино и Бронниц и в июле, когда величина БПК₅ у Софьино была вдвое выше, чем в исходном пункте. В менее выраженном виде повышение БПК₅ на том же участке реки отмечено было летом 1947 г. С. Н. Строганов еще в 1913 г. при рассмотрении данных по р. Москве отмечал период, который характерен замедлением окислительных процессов и даже нарастанием БПК (1913, стр. 141).

Своеобразный ход изменения величины БПК₅ на загрязненном участке был отмечен Б. А. Скопинцевым (1933). Ухудшение состояния водоема на некотором расстоянии от источника загрязнения, возникающее после распада основной массы загрязняющего органического вещества, отмечено давно как явление вторичного загрязнения. На реках это явление наблюдается далеко не всегда. Условия возникновения и количественные параметры для выражения масштабов и последствий этого явления мало изучены. Причинами ухудшения состояния водоема на значительном расстоянии от источника первичного загрязнения могут быть донные осадки, отложившиеся в силу замедления течения на некотором расстоянии от первичного источника загрязнения. Вторым и более частым случаем вторичного загрязнения является усиленное образование органического вещества высшими водными растениями и фитопланктоном. Условия для пышного развития водной растительности на участке реки ниже сброса сточных вод вполне благоприятны. Содержание азота в загрязненных водах увеличивается почти на два порядка (табл. 6, 7, 14), на один порядок возрастает содержание фосфора, концентрация калия увеличивается в 5—7 раз. На загрязненном участке реки значительно пополнен и количественно обогащен состав микроэлементов.

Развитие водной растительности (Кокин, 1963) в водоемах, получающих значительное количество прошедших очистку сточных вод, отражается на качестве воды и создает ряд трудностей при ее использовании для промышленных и хозяйственно-бытовых целей. В связи с этим изучаются способы удаления из сточных вод азота и фосфора. Боган и др. (Bogan a. oth., 1960) показали, что при помощи водорослей может быть

Т а б л и ц а 14
Изменение состава и свойств воды в летний сезон 1948 г.
(средние данные)

Показатели	Беседа	Заозерье	Софьино	Бронни- цы	Коломна
Температура воды, °C	21.4	20.6	21.5	20.8	20.2
Растворенный кислород, мг/л	4.1	6.4	7.5	8.5	9.3
% насыщения кислородом	46	70	80	92	98
БПК ₅ , мг O ₂ /л	10.3	9.8	14.7	10.9	7.9
Окисляемость, мг O ₂ /л	13.0	12.4	12.0	11.9	10.6
Азот аммонийный, мг/л	7.4	6.5	6.6	5.9	5.9
Хлориды, мг/л	54.2	49.9	48.1	44.5	50.0
Прозрачность, см	16.0	18.1	23.0	19.4	23.3
Взвешенные вещества, мг/л	13.4	10.2	13.9	23.6	13.1
Число определений	12	13	14	10	17

удалено значительное количество фосфора. Буш и др. (Bush a. oth., 1961) в полевых опытах установили, что от 50 до 70% азота и от 19 до 68% фосфора может быть удалено при помощи водорослей. Гейтс и Борчард (Gates a. Borchardt, 1964) детально изучили условия извлечения основных питательных элементов водорослями. Вопрос о калии в данном аспекте не рассматривался. Поскольку нарастание содержания калия при евтрофикации водоемов идет замедленными темпами, развитие некоторых видов водных растений может лимитироваться недостатком калия. Готас и др. (Gotas a. oth., 1954) установили, что фактором, лимитирующим развитие водорослей в лагунах, является неорганический углерод. Буш и др. (Bush a. oth., 1961) нашли, что прибавление углекислоты способствует успешному развитию водорослей, извлекающих вещества из бытовых сточных вод. Обильное развитие фито- и зоопланктона в Москве-реке отмечалось неоднократно. В опытах по определению фотосинтеза показано, что на верхнем плесе Беседа—Андреевское наряду с процессами

Т а б л и ц а 15
Биохимическое потребление кислорода (БПК₅) в летние
месяцы (мг/л)

Пункт наблюдений	Расстоя- ние от устья, км	Месяцы			Число наблюдений
		VI	VII	VIII	
Беседа	140	11.7	8.8	10.1	12
Заозерье	120	9.3	10.5	9.5	13
Софьино	90	16.2	17.5	11.1	14
Бронницы	80	18.6	8.7	9.4	10
Коломна	6	7.9	7.8	8.7	17

деструкции продуцируется большое количество органического вещества, хотя на данном участке не отмечено увеличения БПК₅. Как показали опыты Г. Г. Винберга и др. (1966), присутствие даже максимального количества живых водорослей не вызывает увеличения БПК₅, но распад отмерших клеток связан с потреблением большого количества кислорода. Из табл. 14 следует, что прирост органического вещества в июле приближался к величине БПК₅ у исходного пункта наблюдений. Имеющиеся материалы (Драчев и Сосунова, 1953) позволяют приблизительно рассчитать

по разности между содержанием кислорода в затемненных и светлых склянках количество «чистой продукции» по кислороду. При расходах воды в реке 92.4, 46.0 и 28.4 м³/сек. продукция соответственно составляла 33.1, 46.6 и 27.6 т/сутки. Средняя величина 36.3 т/сутки того же порядка, что и содержание органического вещества в исходном пункте наблюдения у Беседы (табл. 11). Приведенные данные дают представление о масштабе продукции органического вещества в загрязненной реке. Значительное увеличение биомассы планктона могло повлиять на увеличение содержания взвешенных веществ у Софьины и Бронниц (табл. 14).

Проведенные в 1965 г. определения А. Г. Бакулиной показали увеличение содержания органического углерода в воде Москвы-реки выше Воскресенска до 17.0 мг/л по сравнению с 13.2 мг/л в вышележащем пункте у Бронниц. При расходе воды 80 м³/сек. увеличение содержания углерода на 3.8 мг/л выше Воскресенска составит около 30 т/сутки.

Таким образом, в летнее время содержание органического вещества, а следовательно, и кислородный режим реки определялись, несмотря на малую прозрачность воды (табл. 14), в основном фотосинтетической деятельностью растений. По биохимическому потреблению кислорода наибольшее накопление массы органического вещества наблюдалось на участке реки на расстоянии 50—80 км от места выпуска сточных вод, что по времени соответствовало 3—5 суткам перемещения водной массы. Суммарная суточная продукция органического вещества по масштабу примерно соответствовала количеству органического вещества, сбрасываемого в реку со сточными водами города.

КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ РЕКИ И ПРОЦЕССЫ САМООЧИЩЕНИЯ В ОСЕННИЙ ПЕРИОД

Своеобразные черты баланса органического вещества в р. Москве в летний период в значительной мере объясняются замедлением скорости течения плотинами. Преобладание процессов синтеза над распадом органического вещества связано с обильным развитием фитопланктона на участках замедленного течения. По мере приближения осени деятельность фитопланктона, в особенности синезеленых водорослей, начинает ограничиваться температурными условиями.

При проведении осенних наблюдений изучались изменения легко распадающегося органического вещества и особенности кислородного режима реки. В частности, выяснилось значение аэрации через поверхность водоема и при перепаде воды через плотины (Медведев, 1940). Вопросы баланса растворенного кислорода изучались в 1947 г. на участке реки, отграниченном плотинами у Беседы и Андреевского. Общая картина процессов распада органического вещества и кислородного режима на всем протяжении реки изучалась в 1948 г.; повторные наблюдения при изменившихся условиях проведены в 1964 г.

Исследования, с известной условностью отнесенные к осеннему периоду, охватывают сентябрь—ноябрь. Наиболее характерным признаком для этого периода является понижение температуры воды от максимальных летних до устойчивых зимних.

Повышенная растворимость кислорода при низких температурах наряду с понижением потребления кислорода в реке обуславливает осенний максимум содержания кислорода на незагрязненном участке реки (табл. 1).

Вследствие непрерывного понижения температуры каждый из осенних месяцев имеет свою характеристику. Сентябрьские данные, в особенности при погожей осени, могут быть отнесены к летнему периоду, хотя начавшийся спад температуры вносит свои изменения. Более интересны

данные поздней осени, освещающие период, предшествующий переходу к зимнему подледному периоду. Сравнением данных поздней осени, когда вода по температуре приближается к зимней, можно выявить влияние ледяного покрова.

Ниже будут приведены результаты изучения кислородного режима осенью 1947 г. на наиболее загрязненном участке реки Беседа—Андреевское и по всему протяжению реки осенью 1948 г.

В метео- и гидрологическом отношении осень 1947 г. отличалась сухим и теплым сентябрем и более теплым, чем обычно, октябрем и ноябрем. В ноябре было значительное количество осадков, выпадавших равномерно в течение месяца. Вследствие сухой погоды в сентябре и октябре и отсутствия затяжных дождей в ноябре в целом осень характеризуется равномерной и низкой водностью.

Одновременные исследования в пункте у Беседы и у Андреевского были начаты с 14 X. Двукратная выемка проб (утром и вечером) в каждом пункте дала возможность получить сравнимый материал. В период наблюдений температура воздуха постепенно падала от $+11^{\circ}$ до $-2, -3^{\circ}$. Температура воды понижалась от $+9^{\circ}$ в начале наблюдений до $+2.8^{\circ}$. Погода стояла большей частью тихая, что способствовало выявлению загрязненности реки нефтью. Постоянно отмечалось наличие пленки и загрязненности поверхности от 2 до 5 баллов по пятибалльной системе. Расходы воды в реке были устойчивыми и за период наблюдений составили в среднем $36.7 \text{ м}^3/\text{сек.}$, из которых на долю сточных вод приходилось $9 \text{ м}^3/\text{сек.}$ Таким образом, по гидро- и метеоусловиям период наблюдений был типичен для поздней осени. Бьеф Беседа—Андреевское протяженностью 14 км не имеет притоков, и потому расходы воды приняты равными в начальном и конечном пункте. На данном участке реки интенсивно происходили процессы самоочищения. Вода реки, получив стоки наиболее мощного в то время источника загрязнения — Люблинского комбината очистных сооружений, при перепаде через плотину у Беседы становится однородной по составу и физическим свойствам. Несмотря на выравнивание расходов реки и сравнительную устойчивость погоды осенью 1947 г., отмечены значительные колебания по дням содержания растворенного кислорода, взвешенных веществ и БПК₅, как это видно из табл. 16, в которой приведены амплитуды колебаний за срок наблюдений и средние данные по основным показателям качества воды.

Исходя из расхода воды за период наблюдений и данных химического состава, произведен расчет расхода вещества в пунктах наблюдений (табл. 17).

Достаточно определенно выявлена устойчивость содержания аммонийных солей. Изменение содержания взвесей на данном участке было незначительным. Отчетливо выявляется на этом фоне изменение величин БПК₅ и растворенного кислорода.

Исходя из полученных данных, можно произвести расчеты скорости окисления органических веществ. Часовая величина понижения содержания органических веществ, по С. Н. Строганову (1939), составляла 0.38 мг. Вычисляя величину константы распада органического вещества по принятой формуле (Базякина, 1933), получаем величину $k_1 = 0.26$.

Таким образом, несмотря на низкую температуру, скорость окисления органического вещества по БПК₅ выше, чем летом.

Высказанные выше соображения о роли процесса фотосинтеза в балансе органического вещества в реке согласуются с полученными осенью данными. При низкой температуре воды процессы образования органического вещества если и происходили, то в значительно меньшем масштабе. Содержание растворенного кислорода снизилось почти на $1/3$,

Т а б л и ц а 16

Основные показатели качества воды. Октябрь 1947 г.

Показатели	Количество определений	Содержание		
		мини- мальное	макси- мальное	среднее
Беседа				
Температура воды, °С	20	3.0	9.5	5.7
Растворенный кислород, мг/л . .	20	3.4	10.0	7.2
% насыщения кислородом	20	27	74	45
БПК ₅ , мг О ₂ /л	20	14.1	24.4	19.6
Окисляемость, мг О ₂ /л	20	12.7	21.4	15.4
Азот аммонийный, мг/л	20	5.0	9.5	7.0
Хлориды, мг/л	20	44.4	57.6	49.0
Прозрачность, см	19	8.0	14.6	10.4
Взвешенные вещества, мг/л	20	8.0	20.4	14.2
Андреевское				
Температура воды, °С	18	3.0	10.0	5.7
Растворенный кислород, мг/л . .	18	0.8	8.6	4.7
% насыщения кислородом	18	6.0	64	36
БПК ₅ , мг О ₂ /л	18	8.3	14.4	11.6
Окисляемость, мг О ₂ /л	16	12.8	17.7	15.2
Азот аммонийный, мг/л	18	3.4	10.2	7.3
Хлориды, мг/л	18	42.2	54.9	49.2
Прозрачность, см	18	7.0	18.0	11.6
Взвешенные вещества, мг/л	18	8.0	20.0	13.2

Т а б л и ц а 17

Суточный расход веществ осенью

Показатели	Беседа		Андреевское	
	мг/л	т/сутки	мг/л	т/сутки
Азот аммонийный . . .	7.0	22.0	7.3	23.1
Хлориды	49.0	155.4	49.7	157.6
Растворенный кислород	7.2	22.8	4.8	15.2
БПК ₅ (О ₂)	19.6	62.1	11.6	36.8
Взвешенные вещества . .	14.8	46.9	13.2	41.8

еще более значительным было понижение содержания органического вещества (по БПК₅).

Понижение содержания органического вещества в воде реки на протяжении от Беседы до Андреевского составило 25.3 т/сутки, содержание растворенного кислорода уменьшилось на 7.8 т/сутки. Вычитая последнюю величину из первой, получаем, что окисление 17.5 т/сутки органического вещества должно быть отнесено за счет кислорода, поступившего в водоем из воздуха. При площади акватории в 2 км² коэффициент аэрации через поверхность условно может быть принят равным 8.8 г О₂/сутки.

Интенсивное развитие окислительных процессов на участке Беседа—Андреевское значительно замедляется на нижележащих участках реки. Так, в ноябре величина БПК₅, по средним данным, составила у Беседы

Т а б л и ц а 18

Средние данные показателей качества воды за осень 1948 г.
на участке реки от Беседы до Коломны

Показатели	Беседа	Заозерье	Софьино	Коломна
Температура воды, °С	9.4	9.0	7.7	7.4
Растворенный кислород, мг/л	6.8	8.1	8.9	10.2
% насыщения кислоро- дом	57	62	68	83
БПК ₃ , мг O ₂ /л	6.2	5.1	3.2	3.2
БПК ₅ , мг O ₂ /л	8.9	7.6	6.7	6.4
Окисляемость, мг O ₂ /л	12.8	12.2	10.6	10.7
Азот аммонийный, мг/л	7.5	7.3	6.2	7.1
Хлориды, мг/л	54.8	53.6	46.8	42.6
Прозрачность, см	16.5	17.9	25.5	22.5
Взвешенные вещества, мг/л	11.1	16.8	18.3	11.1
Число определений . . .	12	11	12	16

27.4, у Андреевского 8.5 и у Коломны 7.3 мг O₂/л. На протяжении 14 км снижение составило 18.9 мг O₂/л, на участке 152 км 1.2 мг O₂/л. Довольно высокая величина БПК₅ держалась весьма устойчиво на большом протяжении реки.

Наблюдения, проведенные в 1948 г., сходном по условиям погоды с предыдущим годом, но более многоводном, дали результаты, приведенные в табл. 18.

Т а б л и ц а 19

Биохимическое потребление
кислорода и содержание
растворенного кислорода
в октябре 1964 г.

Пункты наблюдений	Число	БПК ₅ , мг O ₂ /л	Раство- ренный кислород, мг/л
Бронницы	9	4.48	8.32
	17	4.48	8.14
Воскре- сенск	15	3.52	8.14
	16	4.32	8.14
Северская	10	4.80	7.80

Вследствие улучшения качества очистки сточных вод и несколько повышенной водности исходная величина БПК₅ в реке у Беседы была вдвое ниже, чем в октябре предыдущего года.

В нижележащих пунктах наблюдений величина БПК₅ мало изменилась, снижение на 2.5 мг O₂/л было достигнуто лишь у Коломны. Величина БПК₅ в конечном пункте наблюдений, у Коломны, 6.4 мг O₂/л, в 3 раза превышает обычно находимую в воде реки на незагрязненном участке выше города.

Относительная стабильность величины БПК₅ на всем протяжении реки в осенний период была подтверждена осенью 1964 г. (табл. 19).

На всем протяжении реки осенью величина БПК₅ не падала ниже 3.5 мг/л, составляя в среднем около 4.5, при высоком и стабильном содержании растворенного кислорода. Таким образом, нет оснований считать недостаток кислорода фактором, ограничивающим возможность окисления органического вещества.

Постоянное присутствие в воде реки довольно высокого и практически стабильного органического вещества, быть может, объясняется стойкостью соединений, поступающих со сточными водами, прошедшими полную биологическую очистку. В особенности это относится к данным 1964 г., когда возросло количество сточных вод, прошедших полную очистку.

Вероятно, повышение величины БПК₅ происходит за счет потребления кислорода при окислении аммонийного и нитритного азота. Обычно нитрификационные процессы начинают развиваться в склянках на 5—10-й день после начала опыта. В водах, подвергшихся полной очистке, возможно более раннее влияние этого процесса. Данные табл. 18, где приведены определения трех- и пятидневного БПК, косвенно подтверждают это предположение, так как при более длительных сроках наблюдения отмечено резкое снижение БПК вниз по течению реки. Но при трехдневных сроках наблюдения, когда действие нитрификационного процесса маловероятно, величина БПК остается высокой и в отдаленных пунктах наблюдений.

Не исключено влияние на повышение БПК замедленно идущих фотосинтетических процессов. Как известно, иногда обильное развитие фитопланктона наблюдается в зимнее время в подледных условиях.

Т а б л и ц а 20
Отношение содержания растворенного кислорода к БПК₅ (%)

Сезон, дата	Беседа	Бронницы	Коломна
Лето (VI, VII 1946)	17	37	53
Осень (IX 1946)	65	265	260
Зима (III 1947)	20	6	4

и Андреевской плотин, где в основном накапливались донные отложения, содержание взвесей возрастало до 16.8 и 18.3 мг/л. В пункте у Коломны, расположенном ниже Северной плотины, где донных отложений накапливалось меньше, содержание взвесей снижалось до исходной величины.

Резкое изменение кислородного баланса реки происходит поздней осенью после образования ледяного покрова. Так, во время рейса в ноябре 1946 г. было найдено, что содержание растворенного кислорода постепенно повысилось от 10.4 у Беседы до 12.6 мг у Заозерья и составило 10 мг у Бронниц. К г. Коломне, выше которого вследствие сильного мороза на реке образовался лед до 20 см толщиной, содержание кислорода упало до 7.6 мг. Расход в реке растворенного кислорода понизился с 66.3 т/сутки до 47.9 т.

В целом осенний период в отношении кислородного баланса является более благополучным по сравнению с летним и зимним периодами, что может быть иллюстрировано соотношением растворенного кислорода и величины БПК₅ (табл. 20).

Это обстоятельство подтверждается также данными об абсолютных запасах кислорода в реке, резко возрастающих осенью по сравнению с летом и зимой. При отсутствии ледяного покрова благополучное состояние кислородного режима удерживалось бы и в дальнейшем, как это наблюдается в реках, которые зимой не замерзают.

Одним из факторов кислородного режима является аэрация воды при перепаде через плотины. Основная масса воды в реке проходит через плотины с перепадом 2.5—3.0 м. Из-за неплотно прилаженных щитков часть воды бьет струями через щели. Сравнительно небольшая часть воды, идущая на шлюзование судов, не подвергается такого рода аэрации. Наблюдения, проведенные на Андреевской плотине летом и

Наконец, некоторое повышение величины БПК возможно за счет влияния донных отложений, накопившихся в силу замедления течения.

В переходный период от навигационного режима к зимнему со свободным течением реки своеобразно распределяются по продольному профилю взвешенные вещества. В пункте у Беседы, выше которого нет съёмных плотин, содержится в среднем за сезон 11.1 мг/л взвесей. В пунктах у Заозерья и Софьино, расположенных ниже Бесединской

осенью, показали, что обогащение воды кислородом при перепаде через плотины зависит от дефицита кислорода в воде. В летний период при насыщении около 60% заметного обогащения воды кислородом на Андреевской плотине не отмечено. Осенью, когда насыщение воды кислородом до плотины колеблется от 6 до 55%, перепад воды оказывал заметное действие. Исходя из расхода воды и повышения содержания кислорода ниже плотины, установлено, что суточный приход кислорода при перепаде воды на Андреевской плотине составил 13 т, на Бесединской плотине 9, что в сумме составляет 35% от потребности в кислороде (по БПК₅) у Бесединской плотины. Таким образом, на р. Москве имеется фактор улучшения кислородного режима, вступающий в действие автоматически в период малого содержания кислорода; эффект благоприятного действия усиливается по мере понижения содержания кислорода. Как указывалось выше, поступление кислорода через поверхность реки составляло в октябре на участке от Беседы до Андреевского 18.7 т/сутки — величина, сопоставимая с количеством кислорода, поступившего в реку при перепаде через плотины. Обогащение кислородом при перепаде воды через плотины является более дешевым способом снабжения реки кислородом по сравнению с аэрацией через турбины (Scott, 1958) или при помощи специальных приспособлений (Kaplinsky, 1964).

Характерным признаком осеннего периода на р. Москве является резкое возрастание растворенного кислорода, что обеспечивает благоприятный кислородный режим. Это обстоятельство является общим для многих рек нашего Союза, вследствие чего в осенний период создаются более благоприятные условия, для самоочищения реки чем летом и зимой.

КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ И КАЧЕСТВО ВОДЫ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ

Особенностями зимнего периода являются низкая температура воды, понижение ее расхода и ледяной покров, изолирующий водоем от атмосферы. Каждый из указанных факторов оказывает влияние на кислородный режим реки и ход процессов самоочищения. В период поздней осени в реках и озерах отмечается максимальное насыщение воды кислородом (табл. 1), связанное с повышенной растворимостью кислорода в холодной воде и понижением биохимического потребления до минимальных величин. Замедление процессов биохимического окисления особенно выражено при температурах, приближающихся к нулю (Драчев, 1964).

Для многих рек зимние расходы являются минимальными по сравнению с другими сезонами года. По классификации М. Н. Львовича (1938), реки волжского типа с преобладанием в источниках питания снеговых вод имеют два подтипа. Северные реки Русской равнины имеют минимальные расходы зимой, в южных реках минимальные расходы приходятся на летний период. По данным В. Д. Быкова (1951), за 27 лет наблюдений в р. Москве минимальные расходы летом отмечены 13 раз, зимой 9 раз и 5 раз были равными зимой и летом. С тех пор, как началась добавка воды из канала, режим реки в городе и ниже в основном определяется количеством подаваемой воды. Значение разбавления водой канала наглядно было отмечено зимой 1964 г., когда добавка воды не производилась и были обнаружены максимальные загрязнения и концентрации солей.

Ледяной покров имеет решающее значение в отношении кислородного режима, в особенности для загрязненных рек. Как указано в табл. 1, на незагрязненном участке реки в зимние месяцы отмечена наименьшая насыщенность воды кислородом (59—66%). Грунтовые воды, преоблада-

дающие в питании рек зимой, содержат незначительное количество кислорода. Поддержание сравнительно благополучного кислородного режима р. Москвы объясняется насыщением кислородом через полыньи, промоины и перепады воды (Драчев, 1964).

По средним данным, продолжительность ледостава на р. Москве у города составляла 123 дня (с колебаниями от 94 дней в 1933 г. до 168 дней в 1810 г.). Сброс большого объема сточных вод резко изменил условия льдообразования на участке реки в пределах и ниже города.

Данные по кислородному режиму в зимних условиях на р. Москве приведены в некоторых предшествующих работах. М. Б. Коцин (1889) впервые проводил определения кислорода выше и ниже города, им же определялось биохимическое потребление кислорода, «коэффициент изменчивости кислорода», учитываемого по убыли кислорода в течение двух суток в термостате при температуре 33°. Определения ниже города показали небольшое понижение содержания кислорода зимой; более отчетливо снижение кислорода выражено летом.

Иную картину дало обследование, проведенное в 1915 г. на участке от д. Шелепихи до Северского шлюза. Материалы эти в табличной форме приведены в Отчете Временного комитета по изысканию мер охраны водоемов за 1915 г. без текстового комментария. Из таблицы видно, что в январе содержание кислорода в реке ниже города упало до 1.0—2.6 мг/л.

Наблюдения, проведенные С. В. Бруевичем (1927, 1929), показали, что в зимнее время процессы самоочищения протекают крайне замедленно. У Коломны, пункта, наиболее удаленного от места выпуска сточных вод, р. Москва была весьма загрязнена. На участке ниже Андреевского шлюза в воде содержалось 1.0—2.0 мг/л растворенного кислорода.

В зимних исследованиях 1946—1949 гг. наибольшее внимание уделялось кислородному режиму и биохимическому потреблению кислорода. Еже недельные выемки проб проводились в течение всего зимнего периода у Беседы, Заозерья, Софьино, Бронниц и Коломны. В конце зимы в определенных пунктах пробы отбирались ежедневно. Полученные данные дают представление о состоянии реки и ходе самоочищения в течение всего зимнего периода.

Гидрометрические замеры и расчеты расхода воды, скорости течения и наблюдения за состоянием ледяного покрова проводились под руководством М. Г. Рябышева.

Постоянно действующим фактором режима реки являлся забор воды выше города станциями московского водопровода в объеме 8.8—8.9 м³/сек. Количество сточных вод города несколько превышало объем воды, забираемой водопроводом из р. Москвы, что объясняется поступлением в город воды из других источников.

Наблюдения на реке были начаты в 1946—1947 гг. Сравнительно ранний ледостав наступил после сухого и холодного ноября. Декабрь отличался малым количеством осадков (40% по Москве и 90% по Коломне от средней многолетней нормы). Температура декабря была близка к средней многолетней. Январь был холодным, особенно в первую и третью декады. Отмечены отклонения от минимальных температур на 1.1—3.7°. В феврале и в первых двух декадах марта стояла морозная погода, в особенности в первой и во второй декадах февраля. Отклонения от среднедекадных составляли 6.5—5.2°. Особенностью февраля и марта было выпадение большого количества снега (в Москве 282, в Коломне 410% от нормы), образовавшего на реке плотный покров. Устойчивый переход к положительным среднесуточным температурам отмечен с 21 III, ко времени окончания зимних наблюдений. Ледостав наступил во второй декаде ноября. На участке ниже Андреевского лед держался всю зиму. Толщина льда в нижнем течении реки к концу зимы достигала 60—70 см.

Все плотины на реке ниже впадения городских стоков были разобраны после ледостава во второй половине декабря, за исключением Софьинской, которая была разобрана в конце января 1947 г. В связи с устойчивой погодой и отсутствием зимних паводков колебания горизонтов воды в течение всей зимы были незначительны.

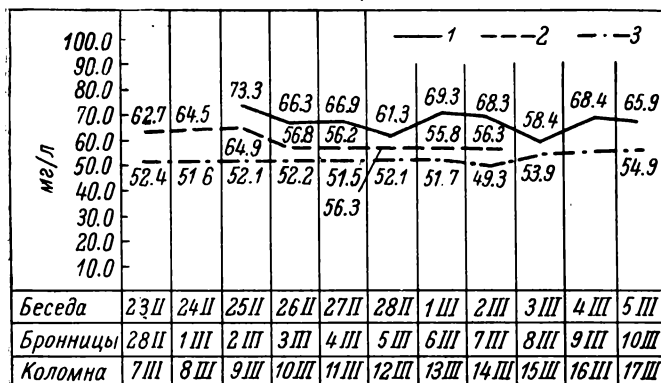


Рис. 4. Содержание хлоридов в р. Москве (корреспондирующие пробы).

1 — Беседа; 2 — Бронницы; 3 — Коломна,

Работа была начата с выявления однородности речного потока по вертикали и горизонтали. Исследованиями в летний период была установлена выравненность солевого состава и физических свойств воды на участке

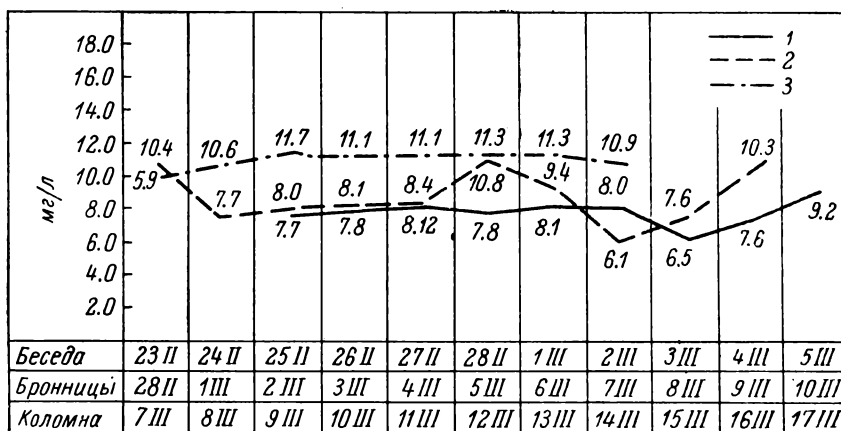


Рис. 5. Содержание аммонийного азота (N) в р. Москве (корреспондирующие пробы).

Обозначения те же, что на рис. 4.

ниже Бесединской плотины. Эта же работа была повторена в зимних условиях после того, как плотины были сняты. Данные показали полную выравненность солевого состава по сечению реки в пунктах у Бронниц и Коломны. Сравнительно выравненными по сечению реки оказались солевой состав и свойства воды ниже Беседы. Тем не менее в пункте ниже Беседы производилась выемка трех проб по сечению реки, из которых составлялась средняя проба для химического анализа.

Передвижение массы воды от верхнего пункта наблюдений до Коломны занимало 11 суток. В соответствии с этим расчетом наблюдения были начаты в разные сроки для взятия синхронных проб. Расход воды за весь зимний период был весьма устойчив. Средние расходы составляли в пункте у Беседы в третьей декаде февраля 27 м³/сек., в первой и второй

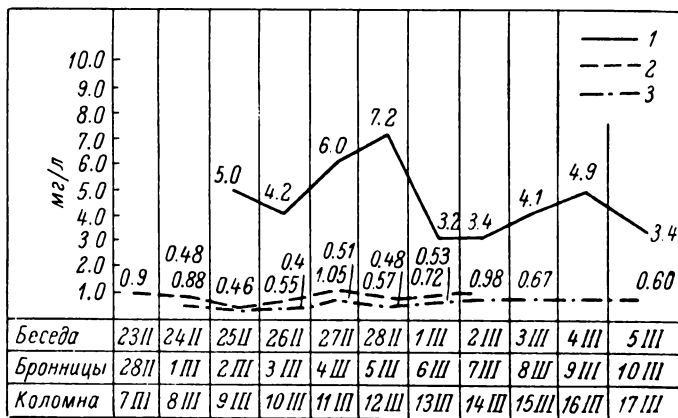


Рис. 6. Содержание растворенного кислорода в р. Москве (корреспондирующие пробы).

Обозначения те же, что на рис. 4.

декаде марта 26 и 28 м³/сек., почти точно отвечая январским и февральским среднемесячным.

В соответствии со стабильностью расходов реки и устойчивым количеством стоков, поступающих в реку, солевой состав воды отличался постоянством; довольно высокая щелочность найдена в реке у Беседы

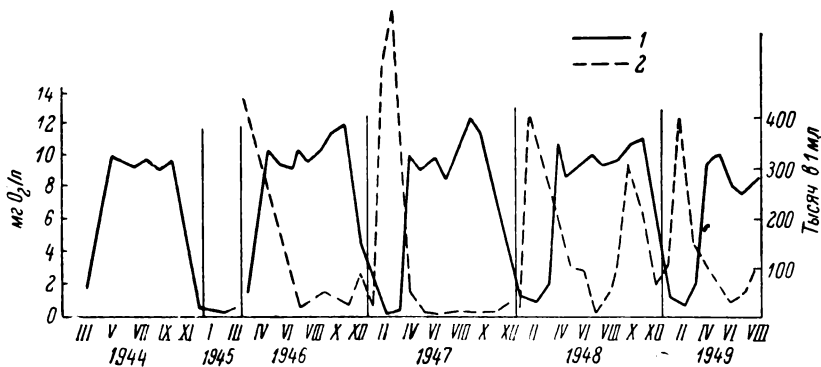


Рис. 7. Содержание растворенного кислорода и сапрофитных бактерий.

1 — кислород, мг/л; 2 — число бактерий в 1 мл.

в пределах 4.72—5.71 мг-экв., в среднем 5.16, а у Бронниц 5.08—5.45. Сравнительно устойчивое содержание хлоридов у Беседы с постоянным понижением содержания последних к устью представлено на рис. 4. Среднее содержание хлоридов составило в пункте у Беседы 66.8, у Бронниц 56.6 и у Коломны 51.0 мг/л. Для многих рек Советского Союза отмечено нарастание концентрации хлоридов к устью. Снижение содержания хлоридов в р. Москве свидетельствует о разбавлении реки водами притоков и подземных источников.

Довольно устойчивым было содержание аммония как в исходном пункте наблюдений, так и в нижележащих (рис. 5). Формы связанного минерального азота за время наблюдений характеризовались следующим образом (мг/л):

	Беседа	Бронницы	Коломна
Азот аммонийный . . .	8.3	11.0	8.7
Азот нитритов	0.10	0.003	0.000
Азот нитратов	0.16	0.11	0.00

Наличие окисленного азота, характерное для природных водоемов зимой (рис. 2), отмечено в пункте наибольшего загрязнения, у Бронниц содержание его уменьшается и к Коломне падает до нуля. Эти изменения вполне согласуются с общим направлением процессов в загрязненной реке. Дефицит кислорода оказался настолько значителен, что в воде реки у Коломны полностью был израсходован и связанный кислород в виде нитритов и нитратов.

Таблица 21

Содержание органических веществ (по БПК₅) зимой по средним данным

Пункт наблюдений	БПК ₅ , мг О ₂ /л	Окисляемость, мг О ₂ /л	БПК ₅ ·100; окисляемость, ‰
Беседа	25.1	23.2	108
Бронницы	11.5	16.2	71
Коломна	12.1	13.0	90

Причины указанного явления можно уяснить из рис. 6, где приведены данные о содержании растворенного кислорода. Наивысшее содержание кислорода найдено в пункте наибольшего загрязнения у Беседы. У Бронниц содержание кислорода исчезающе мало, а у Коломны исчисляется величинами порядка десятых долей мг/л.

Высокое содержание кислорода зимой в пункте, близком к месту сброса сточных вод, является не случайным. Из рис. 3 видно, что в зимний период в пункте у места сбросов сточных вод за ряд лет отмечено довольно высокое содержание кислорода зимой. Прямо противоположную картину дают определения кислорода в конечном пункте наблюдений у Коломны (рис. 7), где летние максимумы сменяются зимними минимумами.

Содержание быстро окисляющегося органического вещества остается высоким и примерно одинаковым как в пункте у Бронниц, так и у Коломны. Средние данные величины БПК₅ и окисляемости приведены в табл. 21.

В табл. 21 величина БПК₅ в пункте у Беседы дана с поправкой на потребление кислорода за счет нитрификации. В пунктах, расположенных ниже по течению, по данным Л. А. Михайловской, потребление кислорода в исследуемой воде за период инкубации за счет окисления азота не происходило.

За 11 дней — время перемещения воды от верхнего пункта наблюдений до Коломны — органическое вещество окислилось лишь частично. В пункте у Коломны в среднем оставалось 45% от исходного количества органического вещества по БПК₅ и 56% по окисляемости.

Отношение величины БПК₅ к окисляемости сохранялось высоким (70—90% до устья), в то время как для чистых водоемов оно составляет 20—25% (Драчев, 1941). Снижение величины БПК₅ происходило на участке реки от Беседы до Бронниц, а ниже к Коломне отмечена некоторая тенденция к повышению величины БПК₅. Последнее особенно подчеркивается при расчете на абсолютные количества вещества в реке (табл. 22).

Весьма существенно (на 21.2 т) снизилось БПК₅ на участке Беседа—Бронницы; снижение растворенного кислорода составило здесь 9.5 т. Оставляя без внимания сравнительно небольшую величину использо-

Т а б л и ц а 22
Содержание и суточный расход растворенного кислорода
и БПК₅

	Беседа		Бронницы		Коломна	
	мг/л	т/сутки	мг/л	т/сутки	мг/л	т/сутки
Растворенный кислород	5.0	11.7	0.75	2.2	0.49	1.7
БПК ₅	25.1	58.6	11.5	37.4	12.1	44.9

ванного связанного кислорода (NO_2' , NO'_3), можно условно считать, что около 12 т органического вещества окислено за счет кислорода, поступившего из атмосферы. При площади зеркала реки в 10 км² получаем величину аэрации 1.2 г/м² на участке реки от Беседы до Бронниц. Длительность перемещения массы воды от Беседы до Бронниц составляет около 5—6 суток.

С городскими стоками в реку вносилось большое количество взвесей, постепенно оседающих вниз по течению. Отчетливо выраженное снижение содержания взвесей происходит на участке Беседа—Бронницы. Близ Коломны в воде реки отмечено некоторое увеличение содержания взвеси, особенно заметное при пересчете на суточный расход (табл. 23).

Т а б л и ц а 23
Содержание и расход взвешенных веществ

Пункт наблюдений	Число определений	Расход воды м ³ /сек.	мг/л	т/сутки
Беседа	10	27.0	49.9	116.4
Бронницы	7	33.5	19.3	55.8
Коломна	6	43.0	23.0	85.4

Выпадение взвеси происходит довольно интенсивно на участке Беседа—Бронницы, уменьшение суточного расхода взвеси составляет 61 т. Процессу оседания взвесей противостоит обратный переход из донных отложений восстановленных газообразных, растворенных и взвешенных соединений.

На участке Бронницы—Коломна происходило ухудшение качества воды, выразившееся в снижении содержания растворенного кислорода, восстановлении минерального азота. При этом величина БПК₅ возросла и увеличился биохимический показатель загрязнения. Повысилось содержание взвешенных веществ. Детальные бактериологические наблюдения Е. В. Диановой и А. А. Ворошиловой (1952) показали значительное возрастание числа сапрофитных бактерий у Коломны (рис. 7).

Таким образом, наблюдения в конце зимы, по метеоусловиям приближающейся к средней многолетней, указало на отсутствие аэрации на участке с постоянным ледяным покровом.

Изложенные наблюдения охватывают конец зимнего периода, когда все особенности этого сезона выражены наиболее резко. Ниже будут приведены наблюдения по отдельным месяцам зимы.

Ледяной покров образовался в нижнем участке в половине ноября, что сразу сказалось на снижении содержания кислорода у Коломны. По наблюдениям, проведенным в декабре у Беседы (3 анализа) и Коломны (4 анализа), состояние реки характеризовалось следующими данными (табл. 24).

Т а б л и ц а 24

Данные о составе воды в декабре 1946 г.

Пункт наблюдений	Температура воды, °С	О ₂ , мг/л	БПК ₅ , мг О ₂ /л	Окисляемость, мг О ₂ /л	Азот			Хлориды, мг/л
					аммонийный	нитратный	нитритный	
Беседа	+1.9	5.5	28.9	22.9	7.0	0.18	0.68	61.8
Коломна	+0.1	5.0	4.9	15.4	7.7	0.16	0.40	53.7

В реке вплоть до устья содержался растворенный кислород, в среднем 33% от полного насыщения, величина БПК₅ к устью резко упала. Об изменениях характера органического вещества к устью можно судить по понижению биохимического показателя загрязнения со 127 у Беседы до 32 у Коломны. Изменения форм азота свидетельствуют о нарастании восстановительных условий; содержание нитритного и нитратного азота к устью уменьшилось.

Т а б л и ц а 25

Основные показатели качества воды у Беседы зимой 1947 г.

Показатели	Месяцы		
	I	II	III
Температура воды, °С	0.63	0.20	0.76
Растворенный кислород, мг/л	3.2	5.9	4.6
% насыщения кислородом	23	41	31
БПК ₅ , мг О ₂ /л	25.0	19.7	22.7
Хлориды, мг/л	69.8	67.7	66.4
Азот аммонийный, мг/л	8.9	7.0	8.6
Прозрачность, см	4.6	6.2	7.5

Результаты наблюдений за изменением содержания растворенного кислорода и величины БПК₅ в последующие месяцы приведены в табл. 25—27. По мере удаления пункта наблюдения от места наибольшего загрязнения отчетливо прослеживается резкое и постоянное снижение содержания кислорода. Второе обстоятельство, также наглядно отмеченное в таблицах, — это значительное снижение БПК₅ на участке Беседа—Бронницы и весьма малое на участке Бронницы—Коломна. Кривые по БПК₅ в некоторые сроки наблюдений для этих двух пунктов пересекаются.

Понижение растворенного кислорода (мг/л) в пунктах у Бронниц и Коломны, по средним данным, отмечается устойчиво из месяца в месяц, что видно из следующих цифр:

	Месяцы			
	XII	I	II	III
У Бронниц	—	3.2	1.8	0.7
У Коломны	5.0	2.2	0.7	0.6

В 1947—1948 гг. зимние наблюдения на р. Москве были продолжены. По гидро- и метеоусловиям зима 1946/47 г. была близка к средним многолетним; следующий год наблюдений был иным. Теплой погодой и обильными осадками отличался ноябрь, весь декабрь стояла неустойчивая

теплая погода с частыми оттепелями и осадками в виде дождя и снега, составившими 213 нормы по Москве и 275% по Коломне. Положительное отклонение от среднееголетних температур составило $+4.1^{\circ}$ в отличие от декабря предыдущего года (-1.5°). Теплая погода удерживалась в январе (отклонение от среднееголетней $+6.9^{\circ}$) и первой шестидневке

Т а б л и ц а 26

Основные показатели качества воды
у Бронниц зимой 1947 г.

Показатели	Месяцы		
	I	II	III
Температура воды, °С	0.8	0.0	0.0
Растворенный кислород, мг/л	3.2	1.8	0.7
% насыщения кислородом	22	12	5
БПК ₅ , мг О ₂ /л	12.4	13.9	10.7
Азот аммонийный, мг/л	10.7	10.4	11.2
Хлориды, мг/л	63.2	57.8	59.3
Прозрачность, см	7.4	8.3	13.8

февраля, после чего до конца февраля установилась ровная морозная погода. Отрицательные отклонения от нормы отмечены во второй и третьей декаде марта, вследствие чего река до конца месяца сохранила зимний режим. Плотины на реке были разобраны во второй половине ноября; разборка Бесединской плотины задержалась до 16 XII. Теплая погода и обильные осадки в ноябре и декабре обусловили повышенные расходы воды в течение почти всей зимы (табл. 28).

Зимой 1947/48 г. расходы в реке почти вдвое превышали среднееголетние данные. Количество сточных вод, поступающих в реку, практически осталось на уровне предыдущего года (9.0—9.1 м³/сек.).

Повышенные расходы обуславливают увеличение скорости течения. Время перемещения водной массы от одного пункта наблюдения до другого составляло (час.):

Годы	Беседа— Андреевское	Андреевское— Софьино	Софьино— Бронницы	Бронницы— Коломна	Беседа— Коломна
1947	21	59	57	126	263
1948	10.5	27.5	28	71	128

Наблюдения зимой 1947/48 г. велись по программе предыдущего года с добавлением пунктов у Андреевского и Софьино.

Ежедневные наблюдения были начаты 20 II и окончены 20 III. Река в период наблюдений сохраняла зимний характер. Увеличение расходов воды в первую и вторую декаду марта с 32.7 до 47.4 и 49.7 м³/сек. в феврале обусловлено подачей воды из Истринского водохранилища (19 м³/сек.). В течение всей зимы у Беседы река была свободна от ледяного покрова, у Андреевского до 5 III лед на реке был толщиной в 10—15 см, при потеплении и возрастании расхода река освободилась от льда, что зимой здесь происходит нередко. На участке между Коломной и Бронницами лед был постоянным и прочным, толщиной 40—60 см, лишь на быстринах были промоины.



Рис. 8. Содержание органического вещества по БПК₅ (т/сутки).

1 — зима 1947 г.; 2 — зима 1948 г.

Сравнивая результаты анализов 1948 г. (табл. 29) с данными предыдущего маловодного года (табл. 25), видим, что в 1948 г. в исходном пункте наблюдений произошло снижение содержания хлоридов, хотя и непропорционально разбавлению. Такого рода снижение хлоридов было отмечено и В. В. Фовановым (1925) при исследованиях на Волге.

В 1948 г. содержание растворенного кислорода было более высоким; аммонийный азот и величина БПК не уменьшились. Последнее обстоятельство особенно резко подчеркивается при пересчете на абсолютные суточные расходы вещества в реке (табл. 29).

Более быстрый ход окисления органического вещества зимой 1947/48 г. отчетливо заметен по данным табл. 27. Наглядно видно ускорение хода окисления органического вещества по сравнению с предыдущей зимой при пересчете на суточные расходы органического вещества по БПК₅ (рис. 8).

Данные расходов позволяют условно вычислить величину кислорода (в г), полученного из атмосферы для всего участка реки и на 1 м² поверхности водоема (коэффициент аэрации A).

Б. А. Скопинцев (1933) проводил расчеты по формуле

$$A = \frac{Q(D_1 - D_2)}{F}, \quad (1)$$

где Q — дебит реки (м³/сутки); D_1 и D_2 — полное биохимическое потребление кислорода в реке в пунктах 1 и 2 (г/м³); F — поверхность реки (м²).

По Н. М. Поповой и Т. С. Нагибиной (1934), вычисление проводится по формуле

$$A = \frac{Q[(a_1 - a_2) + 1.71(n_1 - n_2) - b]}{F}, \quad (2)$$

где Q — суточный расход воды (м³); n_1 и n_2 — содержание аммонийного азота в пунктах 1 и 2 (г/м³); a_1 и a_2 — БПК в пунктах 1 и 2 (г/м³); b — разница между содержанием кислорода в пункте 1 и 2; F — поверхность водоема (м²).

Данная формула может быть применена при условии введения поправки на ход нитрификации при определении БПК.

Две последние формулы рассчитаны на одинаковый расход воды в пунктах наблюдений. Для далеко стоящих пунктов следует приводить расчет по формуле

$$A = \frac{(Qa - Q_1a_1) - (QO - Q_1O_1)}{F}, \quad (3)$$

Таблица 27

 Основные показатели качества воды
в Коломне зимой 1947 г.

Показатели	Месяцы		
	I	II	III
Температура воды, °С	0.2	0.1	0.1
Растворенный кислород, мг/л	2.2	0.7	0.5
% насыщения кислородом	18	14	3.5
БПК ₅ , мг О ₂ /л	9.7	11.3	10.3
Азот аммонийный, мг/л	9.7	8.7	8.7
Хлориды, мг/л	51.0	53.7	51.8
Прозрачность, см . . .	20.7	19.5	16.0

Таблица 28

Среднемесячные расходы воды на Перервинской плотине

Месяцы	1946/47 г.	1947/48 г.	
	м ³ /сек.	м ³ /сек.	в % от многолетней
ХII	18	41	200
I	18	33	249
II	18	34	220
III (первая и вторая декады)	18	46	91

где Q и Q_1 — расход ($\text{м}^3/\text{сутки}$) в выше- и нижележащих пунктах; a и a_1 — БПК₅ ($\text{г}/\text{м}^3$) в выше- и нижележащих пунктах; O и O_1 — кислород ($\text{г}/\text{м}^3$).

Т а б л и ц а 29

Показатели загрязнения по средне-сезонным данным зимой 1948 г.

Показатели	Содержание	
	мг/л	т/сутки
Беседа, расход 51.7 м ³ /сек.		
Азот аммонийный . .	8.56	38.2
Хлориды	53.0	237.0
Кислород растворен- ный	4.95	22.1
БПК ₅	23.9	106.8
Взвешенные веще- ства	39.4	176.0
Андреевское, расход 52 м ³ /сек.		
Азот аммонийный . .	7.57	34.0
Хлориды	53.3	240.0
Кислород растворен- ный	3.56	15.9
БПК ₅	19.0	84.9
Взвешенные веще- ства	47.4	212.9
Бронницы, расход 58.0 м ³ /сек.		
Азот аммонийный . .	8.34	41.7
Хлориды	41.1	206.0
Кислород растворен- ный	2.26	11.3
БПК ₅	7.75	38.8
Взвешенные веще- ства	13.0	65.1
Коломна, расход 68.1 м ³ /сек.		
Азот аммонийный . .	9.7	57.0
Хлориды	38.0	223.6
Кислород растворен- ный	1.89	11.2
БПК ₅	7.42	43.6

Вычисление величины k_2 за первые три месяца 1948 г. по средним данным имеют следующие значения:

Бьеф	k_2
Беседа—Андреевское	0.30
Андреевское—Софьино	0.26
Софьино—Бронницы	0.40
Бронницы—Коломна	0.00

Высокие значения получены для всех участков, расположенных выше Бронниц. Средняя величина константы является довольно высокой и для участка Софьино—Бронницы с непостоянным ледяным покровом.

Произведенные по последней формуле расчеты дали следующие результаты (табл. 30).

В приведенных расчетах мы принимаем пятисуточное потребление вместо полного БПК. Не вводилась также поправка на снижение величины БПК в реке при температурах, близких к нулевым. Поправки эти имеют разные знаки, коэффициент перехода от БПК₅ к полному БПК обычно принимается равным 1.45 (при $K_1=0.1$). Для учета влияния температуры принимается коэффициент 0.6, так что общую величину поправки можно считать находящейся в пределах погрешностей определения величины атмосферной аэрации.

Полученные данные показали высокую величину коэффициента аэрации в 1948 г. для участка Беседа—Бронницы. На этом участке река не имела постоянного и сплошного ледяного покрова, замерзая частично и временно. Зимний ледостав наблюдался неоднократно. На отрезке Бронницы—Коломна в оба года наблюдений поступления воздуха в реку не происходило.

Полученные данные дают возможность произвести расчет константы аэрации k_2 , что сделано по формуле

$$k_2 = \frac{x_t + (O_2 - O_1)}{2.3 D_{\text{средн}} t}, \quad (4)$$

где x_t — потребление кислорода за время t ($\text{мг}/\text{л}$); O_2 и O_1 — содержание кислорода в пунктах 2 и 1 ($\text{мг}/\text{л}$); $D_{\text{средн}}$ — средний дефицит кислорода на участке реки между пунктами 1 и 2 ($\text{мг}/\text{л}$); t — время (в сутках).

Т а б л и ц а 30

Коэффициенты аэрации зимой 1948 г.

Пункт наблюдений	Суточный расход, т		Поверхность, км ²	Аэрация, г/м ²
	БПК ₅	O ₂		
Беседа	106.8	22.1	2.0	7.9
Андреевское	84.9	15.9	8.0	5.2
Бронницы	38.8	11.3	} 11.4	0.0
Коломна	43.6	11.2		

Данные указывают на значительную скорость процесса окисления органического вещества зимой на верхнем участке реки. Вычисление константы скорости потребления кислорода k_1 производится по формуле

$$k_1 = \frac{1}{t} \lg \frac{L_2}{L_1}, \quad (5)$$

где L_2 и L_1 — БПК₅ в ниже- и вышележащих пунктах; t — время перемещения водной массы от пункта 1 до пункта 2. Вычисляя k_1 на основании данных наблюдений, получаем для участка Беседа—Бронницы величину 0.2 и для того же участка в 1947 г. 0.06.

Проводимые определения БПК за 3 и 6 суток позволяют вычислить константу скорости потребления кислорода по обычно применяемой для такого рода расчетов формуле (Базякина, 1933).

Величина k_1 , по данным лабораторных опытов в пунктах у Беседы и Андреевского, в среднем из 18 пар определений равнялась 0.13 (при колебаниях от 0.05 до 0.24), следовательно, довольно близко подходила к обычно принимаемой (0.1). На значительные колебания константы, полученные при обследовании сильно загрязненной р. Потамок, указывают Черчил и Бакингам (Churchill a. Buckingham, 1956).

Для перехода от температуры опыта 18—20° к речным температурам 1—3° необходимо ввести поправку 0.4, следовательно, имеется различие в скорости окисления в реке и склянке.

Для более полного расчета кислородного режима и аэрации водоема необходимо принимать во внимание оседание части легкоокисляющихся соединений со взвесью на дно и переход в воду восстановленных соединений, образующихся при восстановительных процессах на дне водоема.

Наблюдения за две зимы, сильно отличающиеся по гидрологическим и метеорологическим условиям, дали картину, имеющую некоторые сходные черты. На первом этапе превращения органического вещества в сильно загрязненной реке происходит быстрое снижение величины БПК₅. Очень высокие для реки величины БПК₅ — 25.1 в 1947 г. и 26.6 мг/л в 1948 г. снизились к Бронницам до 11.5 и 8.8 мг/л соответственно. Судя по скорости перемещения водной массы, в первом году это произошло на пятые сутки, в последующем на вторые сутки. Зимой 1949 г., близкой по водности и метеоусловиям к предыдущему году, отмечено столь же быстрое снижение БПК₅ к Бронницам с 20.4 до 6.9 мг/л за срок порядка двух суток.

Второй особенностью зимнего периода является довольно высокое, почти стабильное содержание органического вещества на участке Бронницы—Коломна. По средним данным, величина БПК₅ составляла (мг/л):

	1947	1948	1949	1964
Бронницы	11.5	7.7	6.2	11.5
Коломна	12.1	7.4	6.3	7.6

Ни в один из годов наблюдений БПК₅ у Коломны зимой не опускалось ниже 6.3 мг/л, в 3—4 раза превышая величину, свойственную реке на незагрязненном участке. При этом в непосредственно послевоенные годы практически снижения БПК₅ не отмечено на участке протяженностью в 80 км. Этот путь вода проходила в срок от 3 до 6 дней в зависимости от водности года. Заметное снижение величины БПК₅ отмечено в 1964 г., когда существенно изменились условия сброса сточных вод и несколько улучшился кислородный режим. Зимой 1964 г. содержание кислорода в воде на участке Бронницы—Коломна находилось в пределах 1.7—3.1 мг/л, тогда как ранее содержание кислорода на этом участке было менее 1 мг/л.

Быстрое снижение величины БПК на верхнем участке реки и весьма замедленное или даже полная остановка распада органического вещества в нижнем течении реки связаны в первую очередь с содержанием растворенного кислорода. Выше приведены данные о высоком значении коэффициента и константы аэрации на участке реки, свободном от льда или с нарушенным ледяным покровом. Но наличие кислорода, являющееся непременным условием окисления органического вещества, не объясняет причин быстрого развития окислительных процессов, превышающего обычные скорости процессов окисления органического вещества в реках зимой.

Одним из факторов понижения БПК может быть осаждение на дно взвешенных веществ, которое в зимних условиях интенсивно происходит на участке Беседа—Бронницы. В пересчете на суточный расход взвешенных веществ по средним величинам получены следующие данные (т):

	1947	1948
Беседа	118.4	176.0
Бронницы	55.7	65.1
Коломна	88.0	57.0

Наиболее интенсивно выпадение взвесей происходит на участке до Бронниц, в дальнейшем процесс сильно замедляется. У Коломны в 1947 г. содержание их в воде даже повышается.

В 1947 г. на участке Беседа—Бронницы выпадало за сутки 62.7 т, в 1948 г. 110.8, в 1949 г. 85.7 т. Снижение БПК₅ и растворенного кислорода составило за сутки следующие величины (т):

	1947	1948	1949
БПК ₅	21.2	68.0	47.0
Растворенного кислорода	9.5	10.8	3.2

Приняв, что снижение органического вещества произошло за счет окисления кислородом, поступившим из атмосферы на участке Беседа—Бронницы, получаем следующие величины (т): 1947 г. — 11.7; 1948 г. — 57.2; 1949 г. — 43.8. Отнеся указанные величины к площади зеркала реки (10 км²), условно рассчитываем количество кислорода, поступающего из атмосферы на единицу площади. Коэффициент аэрации по годам составит соответственно в 1947, 1948 и 1949 гг. 1.2, 5.7 и 4.4 г/м². Наименьшее значение аэрации в 1947 г. объясняется значительно более суровой зимой по сравнению с мягкой зимой 1949 г., и особенно 1948 г.

Снижение БПК на участке Беседа—Бронницы, как указано выше, частично может происходить за счет оседания взвешенных веществ, которое наблюдается в большом масштабе именно на этом отрезке реки. По данным Болмат (Balmat, 1957), в сточных водах на долю оседающей фракции взвеси (размером более 100 мк) приходится 15.2% от общего потребления кислорода. В эстуарии р. Темзы потребление кислорода взвесью сильно колебалось, составляя в среднем около 3% от сухого веса (Effects. . . , 1964).

По определениям в воде р. Москвы на долю оседающей фракции приходилось 19% от общего потребления кислорода (Drachev, 1962). Для выяснения роли оседающих фракций взвеси и поступления восстановленных продуктов со дна в кислородном балансе необходимо проведение специальных исследований.

Материалы исследований за ряд лет указывают, что через свободную от льда поверхность ниже впадения стоков в реку поступает в мягкие зимы значительное количество кислорода. В суровые зимы величина атмосферной аэрации резко снижается. Для таких лет целесообразнее проводить расчеты кислородного баланса реки и необходимой степени очистки сточных вод, не принимая во внимание поступление кислорода из воздуха.

Используя результаты проведенных наблюдений и учитывая, что зимний период является критическим в жизни водоемов, можно установить степень разбавления и очистки сточных вод г. Москвы, необходимые для оздоровления Москвы-реки (Болдырев, 1948).

При расчете нами было сделано допущение, что р. Москва и ее притоки в пределах города не получают стоков как промышленных, так и хозяйственно-фекальных и, следовательно, содержание растворенного кислорода выше стоков равно 8 мг/л (табл. 1).

Исходя из расходов сточных вод (30 м³/сек.) и полной (до 10 мг БПК₅) очистки, определим минимальное разведение для сточных жидкостей в водоеме по формуле

$$\frac{Q}{q} = \frac{0.55 \cdot x_1 + 4}{O_2 - 0.55x_2 - 4}, \quad (6)$$

где Q и q — расход реки и сточных вод (в м³/сек.); x_1 — БПК₅ очищенной сточной жидкости (в г/м³); x_2 — БПК₅ чистой речной воды в г/м³ (2 г/м³); O_2 — содержание растворенного кислорода (в г/м³) в реке выше города в феврале—марте.

Подставление соответствующих цифр дает величину необходимого разбавления (3.2). Таким образом, для поддержания необходимого кислородного минимума при условии полной очистки необходим расход воды в реке выше стоков во время зимнего меженного периода в 66 м³/сек.

Высчитаем максимальную величину потребления кислорода городских сточных вод, которые могут быть спущены в реку при существующем дебите реки по формуле

$$x_1 = 1.8 \frac{Q}{q} \cdot (O_2 - 0.55x_2 - 4) - 7.3, \quad (7)$$

где обозначения те же, что и в предыдущей формуле.

Подставляя цифровые значения при Q , равном 60 м³/сек., получим необходимость очистки до величины БПК₅ (3.1 мг/л). Данная величина стоит пока за пределами практической возможности очистки. Следовательно, при современном дебите р. Москва будет оставаться дефицитной по кислороду и после полной очистки сточных вод.

Мыслимы различные пути к устранению возникающего в реке кислородного дефицита. Один из этих путей детально обсуждался в годы строительства канала им. Москвы (1932—1935) и был практически реализован. Сущность этого приема заключается в разбавлении реки чистой водой, насыщенной кислородом.

Выше дан расчет количества воды, потребного для устранения кислородного дефицита. Количества эти находятся на грани современных возможностей обводнения реки за счет канала им. Москвы. Экономические соображения, побудившие в военные годы отказаться от этого приема оздоровления реки и сохранившие свое значение сейчас, заставляют искать другие

технические решения. Такими решениями могут быть дальнейшее снижение содержания органических веществ в очищенных сточных водах; снабжение реки кислородом путем подачи атмосферного воздуха; использование сточных вод после очистки для нужд промышленности и сельского хозяйства.

Техническая возможность первого приема не подлежит сомнению, так как имеются установки, дающие более очищенную воду, чем принято нами в расчетах. Следовательно, дело идет об экономических возможностях. Искусственное обогащение реки кислородом имеет практические решения. В США применяют подачу воздуха насосами (Karplovsky, 1964) и через турбины электростанций (Scott, 1958).

При изучении р. Москвы получены данные о насыщении воды кислородом при перепаде через плотины. Установлено, что при дефиците растворенного кислорода в 60—70% река при перепаде через плотину получала его 5—15 т/сутки.

В зимний период при повышении растворимости кислорода в холодной воде значение этого приема возрастает. Оставляя плотины на реке неснятыми до конца зимы при существующих условиях, можно если не ликвидировать, то значительно снизить кислородный дефицит в реке.

Наиболее радикальным способом улучшения кислородного режима реки и полного оздоровления водоема является сокращение сброса сточных вод путем их использования в промышленности и сельском хозяйстве. В Англии и США сточные воды находят применение в металлургической и нефтяной промышленности. При этом предприятие оплачивает используемые сточные воды (Powel, 1956). Несмотря на дефицит воды в Москве и Подмоскovie, данный способ использования сточных вод не находит применения.

Вопрос об использовании сточных вод г. Москвы для орошения полей к юго-востоку от Москвы обсуждался неоднократно (Лорх, 1957, и др.). Основным препятствием для широкого использования очищенных сточных вод является необходимость крупных капиталовложений (Горин, 1957). С точки зрения охраны рек от загрязнения важнейшее значение имеет круглогодичное орошение сточными водами, для чего существуют благоприятные технические предпосылки (Канардов и Новиков, 1957).

Выводы

1. Р. Москва в верхнем течении по кислородному режиму, содержанию биогенных элементов и солевому составу сохранила все основные черты природного водоема.

В нижнем течении под влиянием промышленных и бытовых стоков в составе и свойствах воды реки произошли существенные изменения. Сравнительно небольшое повышение суммы растворенных солей идет за счет одновалентных катионов — натрия, калия, аммония — и анионов сильных кислот — сульфат- и хлор-ионов. Содержание общего азота и фосфора возросло приблизительно на один порядок, что соответствует поступлению в реку 6—10 г азота и 0.7 г фосфора от одного жителя города. Поступление в реку натрия, калия, хлор- и сульфат-ионов происходит в основном за счет промышленных сбросов. Бытовые стоки дают не более 10—15% хлора, приблизительно такой же процент натрия и 20% калия.

2. Процессы самоочищения в нижнем течении реки как в летний, так и в зимний период заметно различаются. При обильном содержании биогенных элементов и замедленности течения летом снижение биохимического потребления кислорода происходит слабо и на некотором расстоянии от пункта максимального загрязнения процессы накопления органического вещества начинают преобладать над распадом. Количество

образовавшегося за счет фотосинтеза вещества приблизительно равно поступающему с городскими сточными водами.

Зимой на незамерзающем участке реки отмечено весьма интенсивное снижение биохимического потребления кислорода. На открытом участке реки константа аэрации колебалась в пределах 0.26—0.40, коэффициент аэрации в мягкие зимы достигал 7.9 г/м², значительно снижаясь в более суровые зимы. На нижнем покрытом льдом участке реки при создающихся анаэробных условиях происходит стабилизация органического вещества и даже некоторое повышение содержания легко окисляющихся соединений.

3. За последние 20 лет качество речной воды ниже стоков не ухудшилось, несмотря на увеличение более чем втрое объема поступающих в реку сточных жидкостей. Величина биохимического потребления кислорода зимой в данное время значительно ниже, отмечено некоторое улучшение кислородного режима. Помимо улучшения качества очистки, положительное значение имеет увеличение подачи в реку воды из канала им. Москвы.

Сохранение перепадов воды через плотины в зимнее время явится эффективным и экономичным способом улучшения кислородного режима реки.

ЛИТЕРАТУРА

- Астраков В. И. 1878. О количестве воды, протекающей в реке Москве. Изв. Моск. гор. думы, вып. 8.
- Базякина Н. А. 1933. Значение константы скорости потребления при определении биологической потребности в кислороде сточной жидкости. Санитарная техника, № 3.
- Базякина Н. А. 1948. Аэротенк-смеситель для очистки промышленных вод с высокой концентрацией органического вещества. Изд. Инст. Водгео, М.
- Болдырев Т. Е. (ред.) 1948. Производственные сточные воды. Медгиз, М.
- Бруевич С. В. 1927. Химико-бактериологическое обследование р. Москвы от Хорошевского Серебряного бора до Андреевского шлюза (1925). Тр. Моск. санит. инст., вып. 2.
- Бруевич С. В. 1929. Исследование воды р. Москвы в черте г. Москвы в 1927 г. Тр. Моск. санит. инст., вып. 3.
- Бруевич С. В. и Н. И. Аничкова. 1941. Химия речного стока в Каспийское море. Тр. Каспийск. ком. АН СССР, вып. 14.
- Бубнов С. Ф. 1902. Москворецкая вода у Москворецкого моста. Девятый годовой отчет Московской городской санитарной станции, М.
- Бубнов С. Ф. 1907. Москворецкая вода по течению реки в черте города (1904). Тринадцатый годовой отчет Московской городской санитарной станции, М.
- Бурксер Е. С. и Н. Е. Федорова. 1955. Роль химического состава атмосферных осадков в формировании природных вод. Гидрохим. материалы, т. 24.
- Быков В. Д. 1951. Москва-река. Изд. МГУ, М.
- Былинкина А. А. 1968. Содержание и распределение долгоживущих продуктов деления в водохранилищах Верхней Волги. Наст. сб.
- Василькова З. Г. 1944. К вопросу об очищении воды Москва-реки от яиц гельминтов. В сб.: Медицинская паразитология и паразитарные болезни, вып. 5.
- Винберг Г. Г. 1964. Пути количественного исследования роли водных организмов как агентов самоочищения. В сб.: Радиоактивные изотопы в гидробиологии и методы санитарной гидробиологии, изд. «Наука», М.—Л.
- Винберг Г. Г., Т. Н. Сивко. 1956. Фитопланктон как фактор самоочищения загрязненных вод. Тр. Всес. гидробиол. общ., т. VII.
- Винберг Г. Г., П. В. Остапеня, Т. Н. Сивко, Р. Н. Левина. 1966. Биологические пруды в практике очистки сточных вод. Изд. «Белорусь», Минск.
- Геёнике Г. Г. 1917. По Москве. Изд. Сабашниковых, М.
- Горин Г. С. 1957. Пути очистки и использования сточных вод г. Москвы. Совещ. по использованию и обезвреживанию сточных вод на сельскохозяйственных полях орошения, М.
- Дексбах Н. К. и А. Я. Мусатова. 1940. Гидробиологическое обследование р. Москвы в черте г. Москвы в июне—октябре 1937 г. Бюлл. Моск. общ. испыт. прир., № 5—6.

- Дианова Е. В. и А. А. Ворошилова. 1952. Закономерность развития сапрофитных бактерий в процессе самоочищения загрязненных рек. Микробиология, т. XXI, № 3.
- Драчев С. М. 1941. О биохимическом показателе загрязнения водоемов. Лабораторная практика, № 4.
- Драчев С. М. 1951. Клязьминское водохранилище как источник питьевого водоснабжения В сб.: Санитарная характеристика водоемов, Изд. АМН СССР, М.
- Драчев С. М. 1956. Водохранилища и каналы как источники хозяйственно-питьевого водоснабжения. Медгиз, М.
- Драчев С. М. 1964. Борьба с загрязнением рек, озер и водохранилищ промышленными и бытовыми стоками. Изд. «Наука», М.—Л.
- Драчев С. М. и А. А. Былинкина. 1960. Загрязнение радиоактивными веществами поверхности водоемов. Медицинская радиология, № 6.
- Драчев С. М. и А. А. Былинкина. 1965. Исследование пены как метод обнаружения рассеянных элементов и органических поверхностно активных веществ в водоеме. Тез. III научн. конф. по химии моря, Изд. АН СССР, М.
- Драчев С. М. и Ф. И. Гинзбург. 1944. Мышьяк в природных водах Московской области. Гигиена и здоровье, № 7—8.
- Драчев С. М., Н. М. Кабанов, Л. Е. Корш, О. В. Митягина, Я. А. Могилевский, М. А. Руффель, А. М. Сологуб. 1966. Состояние р. Москвы и мероприятия по ее оздоровлению. В сб.: Продуцирование и круговорот органического вещества в водоемах, изд. «Наука», М.—Л.
- Драчев С. М. и Ф. С. Соболев. 1926. Сравнение водной вытяжки и почвенного раствора. Научно-агрономический журнал, № 2.
- Драчев С. М. и Н. Н. Сосунова. 1953. Превращения органического вещества в загрязненной реке с зарегулированным течением. Тр. Всес. гидробиол., общ., т. V.
- Здановский И. Л. 1926. Каталог рек и озер Московской губернии. М.
- Знаменский А. В. 1935. Исследование воды Москва-реки. Москововолгострой, № 5.
- Знаменский А. В. 1936. Вода Москва-реки. Москововолгострой, № 3.
- Искольдский И. И. 1948. Московский химик Р. Ф. Герман. Природа, № 10.
- Калашникова Е. И. 1913. О распределении стока с полей орошения в р. Москве. Отч. ком. по очистке сточных вод, кн. II.
- Канардов Н. П. и В. М. Новиков. 1957. Опыт круглогодичного орошения сточными водами. Совещ. по использованию и обезвреживанию сточных вод на сельскохозяйственных полях орошения, М.
- Квитницкая Н. Н. 1959. Санитарная характеристика ливневых сточных вод г. Киева. В сб.: Гигиеническое изучение и оздоровление внешней среды, Киев.
- Кобякова Н. А. 1968. Изменение состава катионов в воде р. Москвы под влиянием городских и промышленных стоков. Наст. сб.
- Кокин К. А. 1963. О роли макрофитов в самоочищении воды. Тр. Всес. гидробиол. общ., т. XIV.
- Кольцов Г. В. 1968. Загрязнение р. Москвы металлами, содержащимися в промышленных и бытовых сточных водах г. Москвы. Наст. сб.
- Кононов В. Н. 1936. Санитарная характеристика р. Москвы на протяжении от г. Звенигорода до г. Коломны. Водоснабжение и санитарная техника, № 5.
- Кононов В. Н. и С. Т. Ситнов. 1939. Санитарное состояние р. Москвы в 1937—1938 гг. в черте г. Москвы. Сб. тр. Центр. санит. гигиены. лабор.
- Кочин М. Б. 1889. Опыт систематических наблюдений над колебанием химического и бактериологического состава воды Москва-реки до 1887—1888 гг. Дисс. М.
- Кочин М. Б. 1915. Результаты исследования Москворецкой воды в связи с холерными заболеваниями среди рабочих Прохоровской мануфактуры. Врачебно-санитарная хроника г. Москвы, № 6—7.
- Кравченко И. П. 1930. Исследование р. Москвы и ее описание. Транспечать, М.
- Лорх Г. Г. 1957. К вопросу организации полей орошения на базе сточных вод г. Москвы. Совещ. по использованию и обезвреживанию сточных вод на сельскохозяйственных полях орошения, М.
- Луцких Н. Н. 1947. Гидрографическая сеть. В сб.: Природа г. Москвы и Подмосковья, Изд. АН СССР, М.
- Львович М. Н. 1938. Опыт классификации рек СССР, Тр. Гос. гидрол. инст., вып. 6.
- Медведев А. М. 1940. Аэрация воды на Ленинской плотине и шлюзе № 10. Водоснабжение и санитарная техника, № 12.
- Митягина О. В. 1955. Взвешенные вещества в водохранилищах. Автореф. дисс. Медгиз, М.
- Мускат В. И. 1926. Краткий обзор деятельности совещания по охране рек, питающих Рублевский водопровод г. Москвы. Московский Медицинский журнал, т. 2.

- М у с к а т В. И. 1930. О мероприятиях по охране зоны Московского водопровода. Коммунальное хозяйство, т. 1.
- М у с к а т В. И. 1937. Санитарная охрана источников водоснабжения. ОНТИ, М.
- Н а у м о в С. Н. 1913. К вопросу о влиянии люблинских полей орошения на р. Москву в весеннее время. Отч. ком. по очистке сточных вод, М.
- Н е с м е я н о в С. А. 1951. Донные отложения и кислородный режим водоемов. Изд. АМН СССР, М.
- Н и к и т и н с к и й Я. Я. 1909. Биологическое обследование р. Москвы на протяжении от Рублево до с. Коломна осенью 1907 г. Второй отчет комиссии по производству опытов биологической очистки сточных вод на полях орошения г. Москвы, отд. 1, т. III.
- Н и к и т и н с к и й Я. Я. 1912. Биологическое обследование р. Москвы и ее больших притоков между г. Звенигородом и Рублевской насосной станцией. Отч. Моск. гор. управы, 1912.
- О б з о р р а б о т л ю б л и н с к и х п о л е й ф и л ь т р а ц и и. 1928. Тр. совещ. по очистке сточных вод. М.
- О з е р о в С. А. 1929. Река как источник водоснабжения г. Москвы. Матер. по изысканию новых источников водоснабжения Москвы, т. 2, Изд. МКХ, М.
- О р л о в С. С. 1912. Москворецкая вода по течению реки в черте города в 1905 г. 14-й годовой отч. Моск. гор. станции, М.
- О т ч е т в р е м е н н о г о к о м и т е т а п о о х р а н е в о д о е м о в М о с к о в с к о г о п р о м ы ш л е н н о г о р а й о н а, 1913 г. Река Москва. 1) Планктонное исследование в летнее время; 2) Химическое исследование в пределах г. Москвы. М.
- О т ч е т В р е м е н н о г о к о м и т е т а п о о х р а н е в о д о е м о в. Москва, 1915. Река Москва: а) Микробиологическое обследование в летнее время; б) Химическое обследование в пределах города Москвы; в) Каталог расстояний по р. Москве.
- П о п о в а Н. М. 1959. Вопросы оценки санитарного состояния р. Москвы. Городское хозяйство Москвы, № 2.
- П о п о в а Н. М. 1964. Северная система канализации и оздоровление р. Яузы. Городское хозяйство Москвы, № 2.
- П о п о в а Н. М. и Т. С. Н а г и б и н а. 1934. Самоочищение р. Пехорки в нижнем течении. В сб.: Очистка сточных вод, М.
- П о п о в а Н. М. и Т. П. П е р в а к о в а. 1959. К вопросу об улучшении санитарного состояния р. Москвы. Городское хозяйство Москвы, № 2.
- П р а в о ш и н с к и й Н. А. 1965. Учет загрязнения рек ливневыми водами городов. Водное хозяйство Белоруссии, Минск.
- Р я б ы ш е в М. Г. 1964. Рузский узел. Городское хозяйство Москвы, № 2.
- С к о п и н ц е в Б. А. 1933. К изучению естественного самоочищения рек. Санитарная техника, № 6.
- С к о п и н ц е в Б. А. и Л. А. М и х а й л о в с к а я. 1939. Гидрохимическая характеристика р. Москвы от Звенигорода до Коломны (август 1934 г.). Гидрохим. материалы, т. 11.
- С о к о л о в А. Д. 1911. К вопросу о спуске банных и промышленных вод в р. Москве. Врачебно-санит. изв. Московск. гор. думы, № 1.
- С о к о л о в А. Д. 1922. Состав Москворецкой воды близ Москворецкого моста за период с 1898 по 1910 г. Отч. ком. по очистке сточных вод, ч. I, приложение.
- С т р о г а н о в С. Н. 1913. Планктонное исследование в применении к наблюдениям на р. Москву. Отч. по исследованиям в бассейне р. Пехорки, М.
- С т р о г а н о в С. Н. 1923. Питание Москвы в 1903—1922 гг. по наблюдениям над сточной жидкостью. М.
- С т р о г а н о в С. Н. (ред.) 1937. Вопросы загрязнения и самоочищения водоемов. М.
- С т р о г а н о в С. Н. 1939. Загрязнение и самоочищение водоемов. М.
- Т о л ь ц м а н Ф. 1931. По вопросу о количестве воды в Москве-реке для целей Московского городского водоснабжения. Изв. пост. бюро Всер. водопр. и санит. технич. съездов, т. 1, № 4.
- Т р а х т м а н Н. Н. и Р. И. С к и д а л ь с к а я. 1956. О мерах борьбы с загрязнением р. Москвы. Городское хозяйство Москвы, № 8.
- Т р у д ы К о м и с с и и п о и з ы с к а н и ю н о в ы х и с т о ч н и к о в в о д о с н а б ж е н и я г. М о с к в ы. 1927. Водоснабжение г. Москвы при помощи устройства водохранилищ в верховьях р. Москвы и ее притоков. Вып. 1, Изд. МКХ, М.
- Ф о ф а н о в В. В. 1925. Годовые колебания содержания хлоридов в волжской воде у г. Саратова. Раб. Волжск. биол. станции, т. VIII, № 1—2.
- Ш и г о р и н Г. Г. 1956. К вопросу о загрязненности поверхностных стоков городов. Водоснабжение и санитарная техника, № 2.
- Ш и г о р и н Г. Г. 1963. Способы определения загрязненности поверхностного стока населенных мест. Научн. тр. АКХ, вып. XX, М.—Л.
- B a l m a t J. L. 1957. Biochemical oxidation of various particulate fractions of sewage. Sewage a. Ind. Wast., v. 27, № 7.
- B o g a n R., O. A l h e r t s o n, J. P l u n t z e. 1960. Use of algae in removing phosphorous from sewage. Journ. san. eng. div. amer. soc. civ. engr., v. 86, № 5.

- Bush A., J. Isherwood, S. Rodgi. 1961. Dissolved solids removed from Waste Water by Algae. Journ. san. eng. div. amer. soc. civ. engr. v. 87, № 3.
- Carr J. a. J. Hiltunen. 1965. Changes in the bottom fauna of Western Lake from 1930 to 1961. Limnol. a. Oceanogr., v. 10, № 4.
- Charchill M., Buckingham. 1956. Statistical method for analysis of stream purification. Sewage a. Ind. Wast., v. 26, № 4.
- Davis Ch. 1964. Evidence for the eutrophication of lake Erie from phytoplankton records. Limnol. a. Oceanogr., v. 9, № 3.
- Drachev S. M. 1962. The oxygen regime and selfpurification in reservoir with retarded discharge. Intern. conf. of water pollut. res., London.
- Effects of polluting discharge on the Thames estuary. 1964. Water pollut. res. Techn. paper, № 11, London.
- Edmondson W. 1961. Changes in Lake Washington following an increase in the nutrient income. Verhandl. Intern. Ver. Limnol., 14.
- Gates W. a. J. Borchar d. 1964. Nitrogen and phosphorous from domestic effluents. Journ. water pollut. contr. feder., v. 36, № 4.
- Gotaas H., W. Oswald a. A. Ludwig. 1954. Photosynthetic reclamation of organic wastes. Sci. monthly, v. 79, № 6.
- Hasler A. 1947. Eutrophication of lakes by domestic drainage. Ecology, v. 28, № 4.
- Kaplovsky A. 1964. Artificial aeration of canal in Chicago. Journ. water pollut. contr. feder., v. 36, № 4.
- Ohle W. 1965. Die Eutrophierung der Seen und die radicale Umstellung ihres Stoffinhaltes. Limnology symposium, 1964, Helsinki.
- Powel S. 1956. Adaptation of treated sewage for industrial use. Industr. a. engr. Chem., v. 48, № 12.
- Scott R. 1958. Aeration of stream at power turbines. Sewage a. ind. wast., v. 30, № 12.
- Thienemann A. 1955. Die Binnengewässer in Natur und Kultur. Springer-Verlag, Berlin.
-

ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА КАТИОНОВ В ВОДЕ р. МОСКВЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ БЫТОВЫХ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

Поступление промышленных и бытовых стоков в водоем может довольно резко менять состав и количество растворенных в воде солей. Сточные воды многих промышленных предприятий содержат большое количество минеральных солей. Так, обследованные нами стоки нефтеперерабатывающего завода г. Кстова содержали аммонийного иона 12.5, натрия 4400, калия 250, магния 176.3, кальция 65.0 мг/л. Попадая в водоем, эти соли не подвергаются разложению, характерному для органических соединений. Некоторая часть солей усваивается водными организмами, часть может поглощаться илами. При увеличении минерализации воды происходят изменения в составе сложившихся биоценозов (Лобачева, 1954; Каныгина, 1957).

Изучение влияния промышленных и бытовых стоков на состав катионов р. Москвы производилось с 28 II по 10 III 1964. На основных станциях пробы отбирались в течение трех дней на горизонте 0.6 м батометром Рутнера. Азот аммонийный, общая жесткость и кальций определялись на месте. Пробы на калий и натрий отбирались в полиэтиленовые сосуды и анализировались в лаборатории. Определение азота аммонийного производилось с реактивом Несслера, для участка реки ниже г. Москвы до устья с разведением в 50 раз, что способствовало устранению специфического цвета воды, взвесей и опалесцирующей мути. Для определения общей и кальциевой жесткости использовался комплексометрический метод. В качестве индикатора при определении общей жесткости применялся хромоген черный ЕТ-00. Кальций определялся с мурексидом. Содержание магния вычислялось по разности между общей жесткостью и кальциевой. Определение калия и натрия производилось на пламенном фотометре ФПФ-58 (Резников и др., 1963).

Для характеристики состава катионов в незагрязненном участке р. Москвы пробы брались выше г. Москвы у Рублева (табл. 1).

Т а б л и ц а 1
Состав катионов вод р. Москвы выше г. Москвы
у Рублева (мг/л)

Дата	NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{++}	Ca^{++}	Сумма
28 II 1964	0.22	5.3	2.8	20.4	79.6	108.3
29 II 1964	0.23	5.8	2.4	15.8	65.4	89.6
2 III 1964	0.23	6.5	2.5	15.4	67.8	92.1

С. А. Озеров (1929) при многолетних наблюдениях максимальную минерализацию воды в р. Москве отметил в зимние месяцы, когда преобладающее значение в питании реки приобретали подземные воды. По данным, приведенным в табл. 1, содержание иона аммония у Рублева в зимнее время на порядок выше, чем в чистых водоемах (Драчев и др., 1960).

Непосредственные определения щелочей в москварецкой воде у Рублева были произведены в 1910 и 1926 гг. (Озеров, 1929). Определения калия и натрия, произведенные нами, дали довольно близкие результаты (табл. 1). Высокое содержание щелочно-земельных металлов у Рублева также обусловлено преобладанием в этот период подземных вод.

С 1937 г. увеличение дебита р. Москвы производится за счет вод из канала им. Москвы. В летне-осенний период 1964 г. в р. Москву в среднем подавалось около 30.0 м³/сек. В зимние месяцы подача воды сокращается до 2.6 м³/сек. Канал им. Москвы на 80% питается водами Ивановского водохранилища. При изучении влияния стоков г. Калинина на Ивановское водохранилище в 1964 г. нами было отмечено повышенное содержание в воде водохранилища близ г. Конакова одновалентных катионов (табл. 2).

Таблица 2

Состав катионов вод Ивановского водохранилища
у г. Конакова (мг/л)

Дата	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺
20 III 1964	0.28	25.0	2.7	14.5	63.6
21 III 1964	0.26	17.5	2.5	12.4	60.6

При движении воды по каналу происходит довольно значительное снижение содержания натрия, однако концентрация его остается несколько повышенной по сравнению с чистым участком р. Москвы. Существенных изменений в отношении других катионов не наблюдается (табл. 3).

Таблица 3

Состав катионов вод канала им. Москвы между 7-м и 8-м
шлюзом (мг/л)

Дата	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺	Сумма
28 II 1964	0.25	9.9	2.8	10.0	60.0	83.7
29 II 1964	0.28	10.0	2.5	10.3	58.6	81.6
2 III 1964	0.23	12.5	3.0	12.9	78.4	107.0

В пределах города в р. Москву поступают стоки небольших станций аэрации (Кожуховская, Тушинская, Кунцевская, Щукинская) и промышленных предприятий, имеющих собственные выпуски. Пересекая г. Москву, река принимает ряд притоков (Филька, Пресня, Яуза, Нищенка и др.), загрязненных сточными водами промышленных предприятий и аварийными выпусками городской канализации. Загрязнения, поступающие в р. Москву в пределах города, суммируются у Перервинской плотины (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Состав катионов вод р. Москвы у Перервинской плотины (мг/л)

Дата	NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{++}	Ca^{++}	Сумма
4 III 1964	10.52	67.0	11.5	19.0	76.6	184.6
5 III 1964	12.10	65.0	11.0	18.0	77.8	184.9

Изменение состава катионов в р. Москве в пределах города идет в сторону увеличения содержания одновалентных катионов. Поступление промышленных и бытовых стоков увеличивает содержание аммонийного иона в 40 раз по сравнению с чистым участком.

Возрастание щелочных металлов в р. Москве у плотины Перерва несколько менее значительно, чем азота. По сравнению с чистым участком реки у Рублева содержание натрия в пределах города увеличивается в 11 раз, калия в 4 раза. Концентрация кальция и магния в р. Москве у Перервинской плотины остается почти без изменения.

Основной сброс сточных вод г. Москвы в реку производится тремя станциями аэрации: Люберецкой, Курьяновской и Люблинской, расположенными ниже города. Объем стоков в среднем за февраль—март 1964 г. составлял 25.5 м³/сек.

Т а б л и ц а 5

Состав катионов сточных вод г. Москвы (мг/л)
(среднесуточные пробы)

Станции аэрации	NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{++}	Ca^{++}	Сумма
Люберецкая	8.2	74.4	15.0	11.2	45.6	154.4
Курьяновская . . .	20.0	80.6	14.5	9.6	53.0	177.7
Люблинская	8.4	122.0	15.0	10.0	48.0	204.0

В составе катионов сточных вод (табл. 5) отмечено резкое преобладание натрия, превышающего по содержанию кальций. Другим отличительным признаком является высокое содержание аммонийного иона. Одновалентные ионы в сточной воде составляют почти 80% от суммы катионов.

Соотношение сточных вод к воде реки колебалось в зависимости от сезона года. Наиболее критическим периодом в жизни реки является зима, когда это соотношение составляет 1 : 1.

На участке р. Москвы ниже выпуска основных сточных вод города до устья отбор проб производился с учетом скорости передвижения водных масс. Учитывая скорость течения реки, мы стремились проследить изменение катионного состава воды, отбирая пробы в одном и том же ее потоке. Ниже выпуска основных стоков в р. Москве заметно возрастает содержание аммонийного иона (табл. 6). Вниз по течению реки его концентрация постепенно снижается. Однако содержание аммонийного иона в устьевом участке остается очень высоким. Снижение содержания аммонийного иона может быть объяснено деятельностью микроорганизмов, поглощением донными отложениями и, возможно, разбавлением грунтовыми водами.

Поступление основных городских стоков в р. Москву почти не изменило содержания щелочных металлов. На участке реки от Бронниц до

Коломны значительных колебаний концентраций натрия и калия не наблюдалось (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

Состав катионов вод р. Москвы ниже сброса основных стоков г. Москвы в марте 1964 г. (мг/л)

Пункт наблюдений	Число	NH_4^+	Na^+	K^+	Mg^{++}	Ca^{++}	Сумма
Бронницы	6	16.94	62.0	13.0	18.0	74.0	183.94
	7	15.24	62.0	13.0	27.1	73.2	190.54
	8	14.88	62.0	13.0	—	—	—
Воскресенск	7	18.63	60.0	12.5	17.4	74.0	182.53
	8	11.11	67.0	13.5	19.9	89.4	200.91
	9	10.90	63.0	12.5	18.2	84.2	188.80
Коломна	8	12.58	58.0	13.0	—	86.6	—
	9	12.82	62.0	12.5	—	77.8	—

Практического влияния бытовых и промышленных стоков г. Москвы на изменение содержания щелочноземельных металлов в р. Москве в зимнее время не отмечено. Вниз по течению реки количество катиона кальция несколько возрастает от г. Воскресенска. На увеличение кальция в реке, вероятно, оказывают влияние стоки г. Воскресенска. Концентрация кальция к устью р. Москвы остается почти без изменения. Значительных изменений содержания катиона магния к устью р. Москвы также не отмечено.

Вычисление процентного состава катионов в эквивалентном выражении от суммы дает следующие результаты. В незагрязненном участке р. Москвы у Рублева относительное содержание одновалентных катионов в зимний период составляло 6.8% от суммы катионов в эквивалентах. В канале им. Москвы относительное содержание одновалентных катионов заметно выше: 11.8% экв. Ниже всех выпусков сточных вод г. Москвы одновалентные катионы составляют 44%. Величина эта остается почти без изменения до устья реки.

В чистом участке р. Москвы у Рублева аммонийный ион составил 0.4% от суммы катионов в эквивалентах. При выходе из города относительное значение аммонийного иона в составе катионов возросло до 5.7%. Дальнейшее увеличение содержания аммонийного иона до 9.1% экв. происходит на участке р. Москвы ниже впадения основных стоков города. Примерно на этом уровне с небольшим снижением процентное содержание аммонийного иона сохраняется вплоть до устья.

Удельное значение концентрации катиона калия в сумме ионов в чистом участке реки составило 1.4% экв. Поступление промышленных и бытовых стоков в пределах города увеличило относительное содержание калия в реке до 3.2% в эквивалентном выражении. Значительных изменений в относительном содержании катиона калия после основных выпусков города до устья р. Москвы не происходит.

В составе одновалентных катионов натрия имеет основное значение. Относительное содержание натрия в составе катионов у Рублева 5.4% экв. В пределах города удельное значение концентрации натрия возрастает до 30.3%, превышая относительное содержание магния почти вдвое. Некоторое снижение содержания катионов натрия, отмеченное непосредственно ниже основных выпусков города, вновь восстанавливается к устью реки.

В отношении щелочноземельных металлов отмечена обратная картина. Относительное содержание кальция и магния в пределах города снижается на $\frac{1}{3}$ по сравнению с чистым участком. Поступление основных стоков г. Москвы различно сказывается на относительном значении катиона кальция и магния в составе ионов. Содержание магния несколько увеличивается, кальция уменьшается. Ниже Воскресенска относительное содержание кальция начинает возрастать и к устью реки достигает 46.9% экв.

Как видно, изменение катионного состава воды р. Москвы под влиянием поступления бытовых и промышленных стоков идет в сторону увеличения содержания одновалентных катионов. Количество этих катионов, вносимых с бытовым стоком, приблизительно может быть подсчитано. Считая, что из расчета на одного жителя в канализацию в сутки поступает 8 г азота, 5 натрия, 2.5 г калия (Драчев, 1964), получаем следующие величины суммарного расхода в городе с 6.4 млн жителей (Краткий статистический сборник, 1963): азота 51.2 т, натрия 32.0, калия 16.0 т. Фактический расход одновалентных катионов у Бронниц при расходе воды в реке 59.7 м³/сек. зимой 1964 г. составил азота 81.9 т, натрия — 321.2, калия 67.3 т. Сопоставляя данные по расходу одновалентных катионов, поступающих в р. Москву с бытовым стоком, с фактическим расходом, мы видим, что увеличение азота в р. Москве преимущественно идет за счет бытового стока. Роль бытового стока в увеличении содержания калия и натрия в р. Москве можно подсчитать из приведенных выше данных. Калий, поступающий с бытовым стоком, составляет 30, натрий 10% от общего количества, вносимого в водоем со сточными водами. Возрастание содержания калия и натрия в реке в основном обусловлено поступлением промышленного стока.

Для оценки количества загрязнений, поступающих в р. Москву в пределах города, сделан следующий подсчет расхода вещества (т/сутки). Если принять, что расход воды реки у Перервы и содержание катионов соответствуют незагрязненному участку (табл. 1), то суточный расход вещества в зимнее время окажется равным для аммонийного иона 0.49 т, натрия 12.5, калия 5.5, магния 37.0, кальция 171 т. Фактический расход вещества в сутки у Перервы составил аммонийного иона 18.8 т, натрия 131.8, калия 22.4, магния 39.4, кальция 164.7 т. Из сопоставления данных, рассчитанных по чистой воде и фактически полученных у Перервинской плотины, следует, что со стоками г. Москвы в основном поступает натрий (119 т). Концентрации калия и аммония возрастают примерно в равных количествах, содержание кальция и магния остается почти без изменения.

Ниже всех выпусков г. Москвы расход вещества в сутки у Бронниц соответствует следующим величинам: аммонийного иона 82.0 т, натрия 321.0, калия 67.3, магния 117.1, кальция 381.2 т. Суточный расход вещества у Бронниц по содержанию катионов в чистой воде дает следующие величины: иона аммония 1.2 т, натрия 30.0, калия 13.5, магния 89.0, кальция 412.0 т.

У Бронниц загрязнения, поступающие в р. Москву в пределах города и ниже, суммируются. Приведенный подсчет фактического расхода катионов в р. Москве и рассчитанного для чистой воды показал, что со стоками города в течение суток в р. Москву поступало натрия 291 т, калия 53.8, аммонийного иона 80.8 т. Содержание щелочноземельных металлов оставалось почти без изменений.

Выводы

Бытовые и промышленные стоки г. Москвы, поступающие в р. Москву в пределах города и ниже, резко меняют содержание одновалентных катионов. В чистом участке реки одновалентные катионы составляли

6.8% от суммы катионов в эквивалентном выражении. Ниже г. Москвы относительное содержание одновалентных катионов возросло до 44% экв.

Состав катионов р. Москвы, сформировавшийся под влиянием стоков г. Москвы, на всем участке ниже города остается практически неизменным.

Натрий и калий вносятся в р. Москву преимущественно с промышленными сбросами.

ЛИТЕРАТУРА

- Д р а ч е в С. М., А. С. Р а з у м о в, Б. А. С к о п и н ц е в и Н. М. К а б а н о в. 1960. Приемы санитарного изучения водоемов. Медгиз, М.
- Д р а ч е в С. М. 1964. Борьба с загрязнением рек, озер и водохранилищ промышленными и бытовыми стоками. Изд. «Наука», М.—Л.
- К а н ы г и н а А. В. 1957. Влияние сброса промышленных сточных вод, содержащих легко растворимые минеральные соли, на водные организмы. Изд. инст. ВОДГЕО, М.
- Л о б а ч е в а Л. Л. 1954. Биологическая оценка загрязнения водоема минеральными солями. Автореф. дисс. Минск.
- О з е р о в С. А. 1929. Материалы по изысканию новых источников водоснабжения г. Москвы, т. II.
- Р е з н и к о в А. А., Е. П. М у л и к о в с к а я и И. Ю. С о к о л о в. 1963. Методы анализа природных вод. Госгеолотехиздат, М.
- Р С Ф С Р в 1962 г. Краткий статистический сборник. 1963. Госстатиздат, М.
-

ЗАГРЯЗНЕНИЕ р. МОСКВЫ МЕТАЛЛАМИ, СОДЕРЖАЩИМИСЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ И БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОДАХ г. МОСКВЫ

До настоящего времени основным направлением работ по исследованию влияния сточных вод на естественные водоемы являлось изучение вносимых в водоемы органических веществ и макрокомпонентов минерального состава воды. Вопрос о загрязнении естественных водоемов микроэлементами, содержащимися в сточных водах, представляет существенный интерес при решении вопросов питьевого и некоторых видов промышленного водоснабжения, рыбного хозяйства, а также при изучении биологических процессов, протекающих в водоемах. Однако исследования, посвященные этому вопросу, немногочисленны (Заводнов и др., 1965).

Влияние сточных вод на состав микроэлементов воды р. Москвы изучалось нами в период с 28 II по 10 III 1964 на участке р. Москвы от Рублева до устья, а также у плюза № 7 на канале им. Москвы. Рублево располагается на участке реки выше города и спуска городских сточных вод. Некоторая часть промышленных стоков сбрасывается в р. Москву в пределах города. Стоки главных очистных сооружений находятся между Перервинским гидроузлом и Заозерьем.

В каждом пункте пробы воды брались в течение трех дней. Во всех пунктах отбор проводился синхронно с учетом скорости течения. Вода отбиралась батометром из органического стекла с глубины 0.5 м от поверхности. Часть воды немедленно фильтровалась через мембранные фильтры № 6 (диаметр пор 2—5 мк) в воронке из органического стекла. Фильтры предварительно были обработаны кипячением в 1%-м растворе соляной кислоты и тщательно отмыты горячей бидистиллированной водой. Первые порции фильтрата отбрасывались, последующие собирались в литровые склянки белого стекла с притертыми пробками. В другую такую же склянку помещалась натуральная вода, которая тоже подвергалась анализу.

Методика определения

Определение металлов производилось методом количественного спектрального анализа по разработанной нами методике. Анализировались сухие сульфатные остатки. Для устранения влияния на интенсивность спектральных линий основных компонентов пробы эти остатки предварительно смешивались с буферной смесью в соотношении 1 : 2. Буферная смесь составлялась из двух частей CaCO_3 , одной части Na_2SO_4 и одной части угольного порошка. Необходимость разбавления сухих остатков буферной смесью была вызвана резкими изменениями соотношения основных компонентов в анализируемых водах.

Подготовленные к анализу пробы весом в 25 мг помещались в катер угольного электрода. Электроды изготавливались из обычных спектрально-чистых углей диаметром 6 мм. Длина электродов равнялась 4 см. Один из концов нижнего электрода длиной 12 мм обтачивался до диаметра 3 мм. В обточенной части электрода на глубину 8 мм высверливался канал диаметром 2 мм. Таким образом, стенки канала были толщиной 0.5 мм. Конец верхнего электрода длиной 15 мм также обтачивался до диаметра 3 мм. Пробы слегка уплотнялись стеклянной палочкой и сверху засыпались угольным порошком. Во избежание выталкивания газами в столбике пробы тонкой стеклянной иглой делался вертикальный канал.

Съемка спектрограмм производилась на спектрографе ИСП-28. Источник возбуждения — генератор дуги переменного тока ДГ-2. Ширина щели спектрографа 12 мк. Применялась трехлинзовая система освещения щели с промежуточной диафрагмой 5 мм. Сила тока 16 а. Время экспозиции до полного выгорания пробы обычно не превышало 3 мин. Фотопластинки — репродукционные штриховые изоортохроматические, чувствительность 1.4 ед. по ГОСТу. Проявитель Д-19.

Измерение почернения линий проводилось на микрофотометре МФ-2. Графики для вычисления концентраций строились в координатах $\Delta S/\lg C$. В качестве внутреннего стандарта использовался фон, который фотометрировался в непосредственной близости от линии определяемого элемента на месте спектра, свободном от линий.

Стандарты готовились на искусственной основе из солей кальция, магния и натрия. Соотношение элементов в основе было соответственно 10 : 2 : 0.8. Данное соотношение было определено как наиболее характерное для рек бассейна Верхней Волги. Для приготовления основы спектрально-чистые соли этих элементов, взятые в указанном количестве, обрабатывались дважды перегнанной серной кислотой для перевода в сульфаты и после упаривания прокаливались в муфельной печи при температуре 450°.

Для приготовления основного стандарта металлы или устойчивые соединения определяемых элементов растворялись в серной или азотной кислотах. Затем упаренные растворы смешивались с частью основы, дополнительно обрабатывались серной кислотой, выпаривались и прокаливались в муфельной печи при температуре 450°.

Полученная смесь разбавлялась основой до нужной концентрации элементов в основном стандарте. Было приготовлено две серии стандартов. Основной стандарт 1-й серии содержал медь, хром, никель, свинец, олово, молибден, ванадий, цирконий, галлий и кобальт в концентрациях по 0.1% и серебро в концентрации 0.01%. Основной стандарт 2-й серии содержал марганец, титан, стронций и барий в концентрациях по 1.0%, алюминий 3.0 и железо 5.0%. Шкала стандартов получалась последовательным разбавлением основного стандарта основой в 2 раза. Перед съемкой спектров стандарты, так же как и образцы, смешивались в соотношении 1 : 2 с буферной смесью.

Стандарты снимались одновременно с пробами на одной и той же фотопластинке. Для получения возможно большего количества спектров на одной фотопластинке была изготовлена диафрагма с прорезью 0.45 мм. Это дало возможность размещать на пластинке 158 спектров.

В исследуемых водах были определены концентрации меди, хрома, никеля, свинца, молибдена, серебра, железа, алюминия, стронция, бария, марганца и титана. Олово, ванадий, цирконий, галлий и кобальт находились в воде в концентрациях ниже предела чувствительности настоящей методики и обнаружены не были. Определение элементов производилось по спектральным линиям (Å):

Медь	3247.5 и 3274.0	Железо	3047.6
Хром	3014.8	Алюминий	3082.2 и 2660.4
Никель	3414.8	Стронций	3464.5
Свинец	2833.1	Барий	4934.1 и 2335.3
Молибден	3132.6	Марганец	2801.0 и 2949.2
Серебро	3280.7	Титан	3199.9

В отдельных случаях при резко повышенном содержании определяемого элемента проба предварительно разбавлялась в требуемое количество раз основой для стандартов. Средняя арифметическая ошибка применявшейся методики составляла $\pm 12\%$.

Результаты анализа представлены в табл. 1 и 2. Содержание металлов в воде р. Москвы выше городских стоков, в Рублеве, того же порядка, что и в водах, соответствующих чистым водоемам. Так, по нашим данным, содержание меди в воде Волги выше Калинина в это же время составляло 3 мкг/л, а в Рублеве 2.2—2.5 в фильтрованной воде и 2.5—4.1 мкг/л в натуральной воде. В канале у шлюза № 7 содержание меди было несколько выше.

Хром, никель, свинец, молибден и серебро в воде чистого участка реки не были определены из-за недостаточной чувствительности методики. Сведения в литературе о концентрации указанных элементов в воде незагрязненных участков рек бассейна Волги, расположенных в лесной ландшафтной зоне, очень ограничены, однако могут дать некоторое представление о содержании этих металлов в естественных природных водах района. По данным Д. П. Малюги (1945), в р. Москве у г. Звенигорода никель содержался в концентрации 1.2 мкг/л. Максимальное содержание никеля в притоках Волги, расположенных в лесной зоне, по данным Г. С. Коновалова и др. (1965), составляло 3.7 мкг/л. По нашим данным (1965), в чистых реках водосбора Рыбинского водохранилища содержание никеля не превышает 2.5, свинца 2.5, содержание хрома колеблется от 0.9 до 2.2 мкг/л. Серебро обнаружено не было при чувствительности методики для серебра 0.06—0.15 мкг/л. Максимальное содержание молибдена для рек того же района было определено нами в 0.3 мкг/л. Г. С. Коновалов и др. (1965) определили максимальное содержание молибдена в р. Которосли, равное 1.4, и р. Унже — 1.1 мкг/л.

Содержание железа, алюминия, стронция, бария, марганца и титана в воде чистого участка р. Москвы так же не превышает естественных фоновых величин.

Ниже г. Москвы, в створе Перервинского гидроузла, концентрация металлов резко возрастает. Максимальное содержание меди в натуральной воде составляет 142; в фильтрованной 121 мкг/л. Хрома соответственно 89 и 79.5 мкг/л; никеля 138 и 135 мкг/л; свинца 13.5 и 12.5 мкг/л; молибдена 13 мкг/л и серебра 3.9 в натуральной и 3.5 мкг/л в фильтрованной воде. Указанные концентрации меди и никеля в 1.5—3 раза превышают допустимые нормы содержания этих металлов в воде водоемов санитарно-бытового использования и в 10—14 раз в водоемах рыбохозяйственного назначения (Европейские нормы качества питьевой воды, 1963; Драчев, 1964; Санитарная охрана водоемов, 1964, 1965).

На этом участке р. Москвы содержание железа свыше 2, алюминия 0.3—0.6, стронция около 1, бария 0.1, марганца 0.3 мг/л и титана 20—30 мкг/л. Таким образом, концентрация железа более чем в 20 раз и марганца в 3 раза превышает европейскую норму по органолептическим признакам (Европейские нормы качества питьевой воды, 1963).

Концентрация некоторых металлов в районе Перервинского гидроузла, в частности меди, никеля и хрома, по сравнению с чистым участком реки, увеличена в 40 и более раз.

Содержание металлов в воде р. Москвы в 1964 г. (мкг/л)

Место отбора проб	Дата	Cu		Cr		Ni		Pb		Mo		Ag	
		н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.
Рублево	28 II	2.5	2.5	Ниже предела чувствительности определения, равного 5.0									
	29 II	2.8	2.2										
	2 III	4.1	2.5										
Канал, шлюз № 7	28 II	3.9	3.9	То же									
	29 II	4.0	4.0										
	2 III	6.2	4.9										
Перерва	3 III	142.0	121.0	Ниже предела чувствительности определения, равного 1.0									
	4 III	134.0	108.0										
	5 III	96.5	74.0										
Бронницы	6 III	71.5	40.0	То же									
	7 III	47.0	45.0										
	8 III	63.5	33.5										
Воскресенск	7 III	66.5	52.5	То же									
	8 III	71.5	64.0										
	9 III	73.0	66.0										
Коломна	8 III	42.0	38.0	То же									
	9 III	61.0	50.0										
	10 III	62.0	52.5										

Примечание. Здесь и в табл. 2—4 н. — вода натуральная; ф. — вода фильтрованная.

Содержание металлов в воде р. Москвы в 1964 г.

Место отбора проб	Дата	Fe н. мг/л ф.		Al н. мг/л ф.		Sr н. мг/л ф.		Ba н. мг/л ф.		Mn н. мг/л ф.		Ti н. мкг/л ф.	
Рублево	28 II	0.210	0.160	0.100	0.085	0.175	0.160	43.5	42.5	55.5	49.5	12.5	6.6
	29 II	0.140	0.140	0.080	0.080	0.205	0.195	63.0	48.5	52.0	50.0	11.5	8.1
	2 III	0.280	0.180	0.150	0.120	0.185	0.185	50.0	50.0	61.0	61.0	8.6	8.6
Канал, шлюз 7	28 II	0.200	0.155	0.065	0.040	0.175	0.175	35.0	35.0	94.5	11.5	6.1	5.8
	29 II	0.175	0.160	0.100	0.100	0.190	0.190	35.5	35.5	31.0	9.3	7.3	7.3
	2 III	0.380	0.125	0.280	0.060	0.210	0.195	36.0	36.0	24.5	7.5	13.5	5.9
Перерва	3 III	2.56	2.16	0.52	0.41	1.06	1.06	99.5	95.5	281.0	267.0	26.5	19.0
	4 III	2.44	2.05	0.52	0.40	1.04	0.89	108.0	76.0	312.0	293.0	31.0	25.0
	5 III	2.77	1.95	0.56	0.30	1.10	1.10	100.0	91.5	340.0	307.0	30.0	19.5
Бронницы	6 III	1.78	0.79	0.58	0.16	0.99	0.66	102.0	53.0	245.0	169.0	44.0	16.5
	7 III	1.37	1.04	0.35	0.16	0.94	0.94	59.0	55.0	243.0	243.0	24.5	12.5
	8 III	1.95	0.79	0.63	0.13	0.99	0.66	82.5	54.0	249.0	190.0	50.5	14.0
Воскресенск	7 III	1.31	1.06	0.29	0.18	0.94	0.85	67.0	60.5	218.0	218.0	23.5	15.5
	8 III	2.52	2.21	0.74	0.54	1.50	1.50	74.0	66.0	341.0	341.0	59.0	48.0
	9 III	2.84	2.04	1.01	0.49	1.27	1.27	79.0	79.0	308.0	308.0	93.0	43.0
Коломна	8 III	1.69	1.45	0.32	0.25	1.02	0.93	75.5	75.5	297.0	286.0	30.0	30.0
	9 III	2.35	1.86	0.60	0.27	1.11	1.11	69.0	69.0	299.0	295.0	46.0	25.0
	10 III	2.00	1.50	0.45	0.24	0.97	0.95	98.0	85.0	287.0	257.0	27.5	23.5

Т а б л и ц а 3

Содержание металлов в воде р. Москвы (по средним данным)

Место отбора проб	Cu		Cr		Ni		Pb		Mo		Ag	
	н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.
Ниже предела чувствительности определения,												
равного 5.0												
Рублево	3.4	2.4			133.0	129.0	13.5	12.0				
Канал, шлюз № 7	4.7	4.3	85.0	73.0	110.0	82.0	20.0	9.3	12.0	11.5	3.7	3.2
Перерва	124.0	101.0	80.5	48.0	115.0	141.0	20.5	14.5	7.6	5.8	3.6	2.2
Бронницы	60.5	39.5	86.5	71.5	107.0	102.0	19.0	16.0	8.9	8.1	3.8	2.5
Воскресенск	70.5	61.0	64.5	58.0					7.7	7.5	2.7	2.4
Коломна	55.0	47.0										

Т а б л и ц а 3 (продолжение)

Место отбора проб	Fe		Al		Sr		Ba		Mn		Ti	
	н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.
Ниже предела чувствительности определения,												
равного 5.0												
Рублево	0.21	0.16	0.11	0.10	0.19	0.18	52.0	47.0	56.0	53.5	11.0	7.8
Канал, шлюз № 7	0.25	0.15	0.15	0.07	0.19	0.19	35.5	35.5	50.0	9.4	9.0	6.3
Перерва	2.59	2.05	0.53	0.37	1.07	1.02	102.5	87.5	311.0	289.0	29.0	21.0
Бронницы	1.70	0.87	0.52	0.15	0.97	0.75	81.0	54.0	246.0	201.0	39.5	14.5
Воскресенск	2.22	1.77	0.68	0.40	1.24	1.21	73.5	68.5	289.0	289.0	58.5	35.5
Коломна	2.01	1.60	0.46	0.25	1.03	1.00	81.0	76.5	294.0	279.0	34.5	26.0

Обращает внимание неодинаковое содержание некоторых металлов в воде в течение 3 дней отбора проб. Так, концентрация меди 3 и 5 III у Перервинского гидроузла отличалась приблизительно в 1.5 раза.

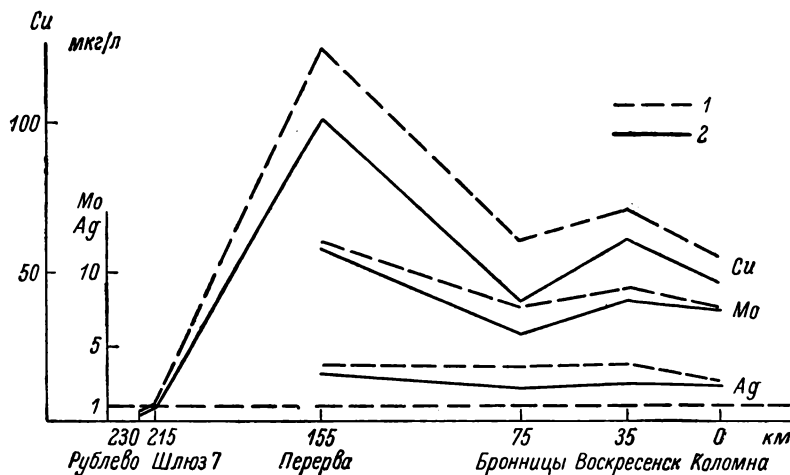


Рис. 1. Изменение содержания меди, молибдена и серебра в воде р. Москвы.

1 — вода натуральная; 2 — вода фильтрованная; прерывистая прямая — предел чувствительности.

В то же время для большинства металлов характерно более или менее постоянное содержание, свойственное определенным участкам р. Москвы.

В табл. 3 и на рис. 1—4 представлено содержание металлов в р. Москве по средним данным за 3 дня. Как уже отмечалось выше, резкое уве-

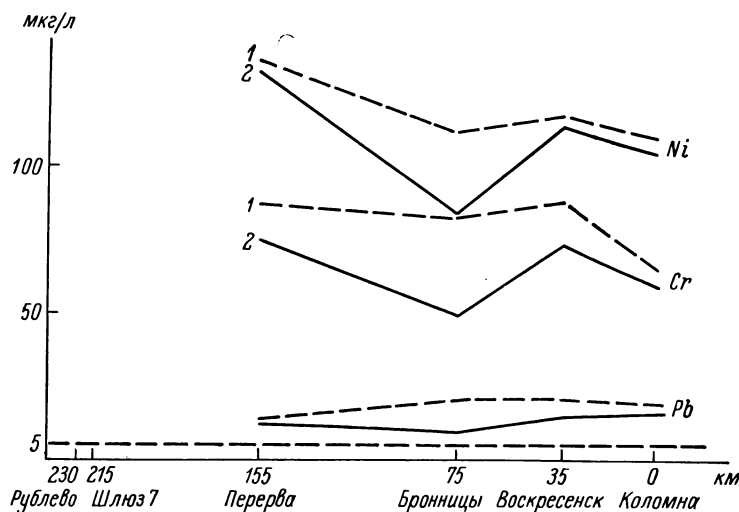


Рис. 2. Изменение содержания никеля, хрома и свинца в воде р. Москвы.

Обозначения те же, что на рис. 1.

личение содержания всех без исключения определяемых элементов наблюдалось у нижней границы города, в створе Перервинского гидроузла. Вниз по течению реки, у Бронниц, концентрация металлов в воде уменьшается. Исключение составляют титан, алюминий, свинец и серебро, содержание которых в натуральной воде увеличивается или остается

прежним, что, по-видимому, можно объяснить случайным попаданием в пробу увеличенного количества соответствующих взвесей.

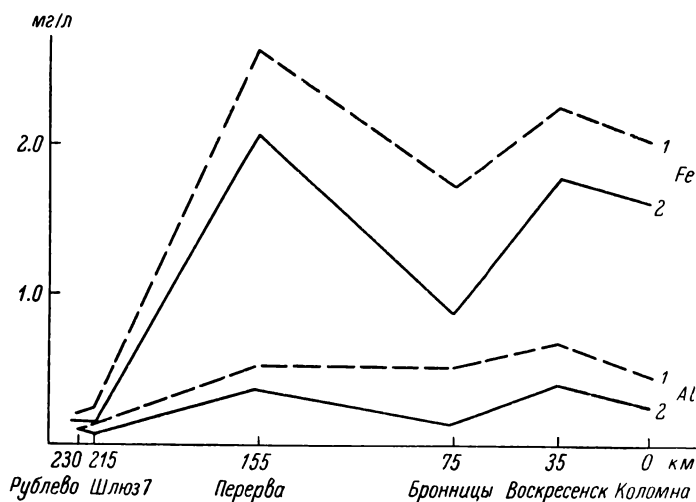


Рис. 3. Изменение содержания железа и алюминия в воде р. Москвы.

Обозначения те же, что на рис. 1.

Общее уменьшение содержания металлов у Бронниц объясняется скорее всего смешением воды р. Москвы со стоками главных очистных соору-

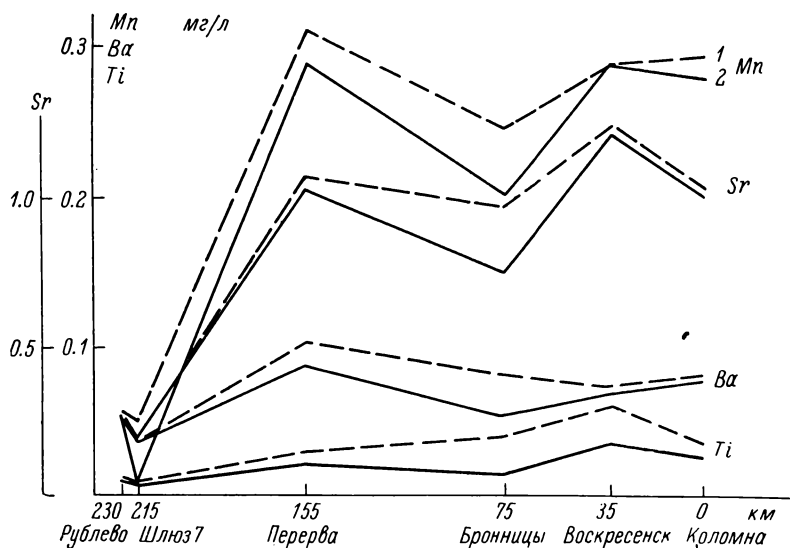


Рис. 4. Изменение содержания марганца, стронция, бария и титана в воде р. Москвы.

Обозначения те же, что на рис. 1.

жений, расположенных несколько ниже Перервинского гидроузла. Так как расход р. Москвы у Перервы в описываемый период составлял 24.9 м³/сек., а расход сточных вод 25.5, то разбавление было приблизительно вдвое.

Наряду с этим существенную роль может играть выпадение из раствора и оседание на грунт различных соединений металлов после смешения вод стоков и р. Москвы.

Т а б л и ц а 4

Содержание металлов в сточных водах, прошедших очистку на станциях аэрации (мкг/л)

Металлы	Курьяновская		Люблинская		Люберецкая		Среднее по трем станциям *	
	н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.	н.	ф.
Медь	24.0	21.0	11.0	10.0	173.0	117.0	67.5	48.5
Хром	29.5	24.0	31.0	31.0	311.0	226.0	119.0	89.5
Никель	55.5	51.0	149.0	147.0	117.0	104.0	98.5	92.0
Свинец	< 5.0 **	< 5.0	< 5.0	< 5.0	19.5	10.5	—	—
Молибден	3.3	3.3	5.7	5.7	6.7	6.7	5.0	5.0
Серебро	< 2.0	< 2.0	< 2.0	< 2.0	17.5	12.5	—	—
Железо	266.0	191.0	234.0	131.0	3480.0	2450.0	1270.0	889.0
Алюминий	129.0	77.0	139.0	62.5	582.0	316.0	275.0	149.0
Стронций	956.0	827.0	469.0	469.0	829.0	829.0	792.0	737.0
Барий	376.0	31.5	45.0	43.5	99.5	68.0	205.0	46.0
Марганец	63.0	63.0	117.0	89.0	161.0	153.0	108.0	98.0
Титан	11.5	10.5	11.0	11.0	42.5	30.5	21.0	17.5

В табл. 4 приводится содержание металлов в сточных водах, прошедших очистку на основных станциях аэрации г. Москвы — Курьяновской, Люблинской и Люберецкой. Особый интерес представляет средневзвешенное содержание металлов в сточных водах, прошедших очистку на этих станциях. Если сравнить изменение концентрации металлов в р. Москве на участке между Перервой и Бронницами (табл. 3, рис. 1—4) с данными табл. 4, то видно, что падение концентрации достаточно удовлетворительно может быть объяснено смешением речных и сточных вод. Исключение составляет хром, находящийся в растворенном состоянии. Его содержание уменьшается, несмотря на то что в сточных водах концентрация хрома больше, чем в реке. Это связано, вероятно, с переходом значительных количеств его во взвеси с последующим оседанием на дно. Уменьшение содержания бария во взвешенном состоянии, несмотря на внесение сточными водами значительно больших, чем в районе Перервы, его количеств, объясняется, по-видимому, быстрым оседанием взвесей.

Ниже Воскресенска содержание металлов увеличивается. Наряду с внесением металлов в реку сточными водами Воскресенска подобное явление, возможно, связано и со вторичным поступлением металлов из донных отложений.

К устью р. Москвы ниже Коломны содержание металлов в воде вновь несколько уменьшается. Небольшое повышение концентрации бария, растворенного свинца и взвешенного марганца находится в пределах ошибки метода определения указанных металлов.

Среднесуточный вынос металлов р. Москвой за пределы города представлен в табл. 5, из которой видно, что рекой выносятся сотни килограмм меди, хрома и никеля.

* Среднее определено относительно стока по станциям. Среднесуточный сток воды, по данным Управления канала им. Москвы, в марте 1964 г. составлял по Курьяновской станции аэрации 948.5, Люблинской 560.0 и Люберецкой 695.5 тыс. м³.

** Концентрация металла ниже предела чувствительности определения, равного 5.0 мкг/л.

По разности содержания металлов в натуральной и фильтрованной водах можно судить о их взвешенной, а также тонкодисперсной и растворенной формах. В табл. 6 показано процентное содержание металла в виде взвесей к общему содержанию металла в воде. Наиболее резкое возрастание взвешенной фракции всех металлов отмечается у Бронниц.

Т а б л и ц а 5
Суточный вынос металлов рекой
за пределы города (кг)

Металлы	Перервин- ский гидроузел	Бронницы
Медь	267.0	296.0
Хром	183.0	394.0
Никель	286.0	538.0
Свинец	29.0	98.0
Молибден	26.0	37.0
Серебро	8.0	17.5
Железо	5570.0	8310.0
Алюминий	1140.0	2540.0
Стронций	2300.0	4740.0
Барий	220.0	396.0
Марганец	669.0	1200.0
Титан	62.0	193.0

П р и м е ч а н и е. Расход воды через Перервинский гидроузел, по данным Управления канала им. Москвы, составлял 24.9 м³/сек.; расход воды через гидротвор у Бронниц составлял 56.6 м³/сек. Замеры расхода произведены гидрологом К. А. Бакулиным.

эти элементы более чем другие связаны с терригенным смывом. Наблюдается повышение до 30% взвешенной части серебра и свинца ниже Воскресенска. В воде канала им. Москвы марганец находится преимущественно во взвешенном состоянии (81%). Выпадению марганца в верхнем горизонте воды несомненно способствует высокое содержание кислорода (9.3 мг/л), а также перемешивание воды при сбросах в р. Москву. Одновременно с марганцем в канале увеличен процент взвесей железа и алюминия.

Основной причиной этого является, вероятно, внесение стоками, расположенными выше Бронниц, большого количества взвесей, содержащих определяемые элементы. Вместе с тем значительную роль может играть и непосредственное выпадение металлов из раствора после смешения вод стоков и реки. Сульфатный остаток натуральной воды у Бронниц составляет 622, а фильтрованной 601 мг/л, так что в 1 л воды содержится 21 мг минеральных взвесей. Это подтверждает, что общее количество минеральных взвесей в воде на этом участке реки довольно велико.

Большинство металлов на других участках р. Москвы ниже города находится преимущественно в тонкодисперсном и растворенном состоянии. Этими формами представлено не менее 80% общего их содержания. Для алюминия и титана взвешенные формы более характерны, так как

Т а б л и ц а 6

Содержание металлов во взвешенном состоянии в воде р. Москвы в процентах к общему содержанию данного металла (по средним результатам определений за три дня)

Место отбора проб	Cu	Cr	Ni	Pb	Mo	Ag	Fe	Al	Sr	Ba	Mn	Ti
Рублево	22.5	—	—	—	—	—	24.0	9.0	5.5	9.5	4.5	29.0
Канал, плюз № 7	8.5	—	—	—	—	—	40.0	53.5	0.0	0.0	81.0	30.0
Перерва	18.5	14.0	3.0	11.0	4.0	13.0	21.0	30.0	4.5	14.5	7.0	27.5
Бронницы	34.5	40.5	25.5	53.5	23.5	39.0	49.0	71.0	22.5	33.5	18.5	63.5
Воскресенск	13.5	17.5	3.5	29.5	9.0	34.0	20.5	41.0	2.5	7.0	0.0	39.5
Коломна	14.5	10.0	4.5	16.0	2.5	11.0	20.5	45.5	3.0	5.5	5.0	24.5

Ниже г. Москвы наблюдается увеличение сухого остатка воды. В связи с этим возник вопрос, не является ли увеличение концентрации металлов следствием увеличения общего содержания солей в воде. Однако величина сухого остатка изменяется менее чем в 2 раза (Рублево 359,

Перерва 604 мг/л) при изменении концентрации металлов в воде реки между этими пунктами в десятки раз. Таким образом, увеличение сухого остатка не является фактором, определяющим изменение содержания металлов.

Значительный интерес представляют весовые соотношения щелочно-земельных элементов, кальция, стронция и бария в воде загрязненных участков реки. Соотношения этих элементов для чистых вод бассейна Верхней Волги, полученные согласно нашим анализам, представлены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7

Содержание и соотношение Ca, Sr и Ba в воде рек бассейна Верхней Волги

Место отбора проб	Дата	Ca, мг/л	Sr, мг/л	Ca : Sr	Ba, мг · 10 ⁻² /л	Ca : Ba	Sr : Ba
Р. Волга, выше Калинина	8 X 1962	32.5	0.10	325	3.4	960	2.9
Р. Волга, выше Дубны . . .	12 X 1962	47.9	0.12	400	3.8	1260	3.2
Р. Волга, Углич	21 IX 1961	31.9	0.14	228	5.0	640	2.8
Р. Тверца, устье	9 X 1962	30.6	0.12	255	4.6	670	2.6
Р. Шексна, шлюз Черная Гряда	29 IX 1961	21.0	0.09	233	2.0	1050	4.5
Р. Молога, Слуды	25 IX 1961	28.9	0.07	413	3.5	830	2.0
Р. Согожа, Пошехонье . . .	23 IX 1961	28.9	0.16	181	5.5	530	2.9
Р. Сить, Тимонино	24 IX 1961	54.7	0.15	364	7.0	780	2.1
Р. Себла, устье	24 IX 1961	28.1	0.11	256	3.5	800	3.1
Р. Суда, устье	1 X 1961	31.3	0.11	284	2.0	1570	5.5
Рыбинское водохранилище, центральная часть, ст. Наволок	23 IX 1961	24.4	0.11	222	3.5	700	3.1
Максимум		54.7	0.16	413	7.0	1570	5.5
Минимум		21.0	0.07	181	2.0	530	2.0
Среднее		32.7	0.12	287	4.0	890	3.2

Отношение Ca : Sr достаточно хорошо согласуется с данными Г. А. Середы и Ц. И. Бобовниковой (1965), которые для рек подобной ландшафтной зоны определили это отношение равным 231.

В табл. 8 представлены те же соотношения для исследованных участков р. Москвы. Выше города, у Рублева и в канале, отношения Ca : Sr, Ca : Ba и Sr : Ba составляют в среднем 362, 1640 и 4.5. Отношения Ca : Sr и Sr : Ba хорошо согласуются с показателями для чистых водоемов. Отношение Ca : Ba увеличено незначительно.

Ниже города, на загрязненных участках реки, наблюдается резкое смещение отношения Ca : Sr до величин менее 100. Не менее показатель-

Т а б л и ц а 8

Содержание и соотношение Ca, Sr и Ba в воде р. Москвы

Место отбора проб	Ca, мг/л	Sr, мг/л	Ca : Sr	Ba, мг · 10 ⁻² /л	Ca : Ba	Sr : Ba
Рублево	67.7	0.18	376	4.7	1440	3.8
Канал, шлюз № 7	66.1	0.19	348	3.6	1840	5.3
Перерва	76.8	1.02	75	8.8	870	11.6
Бронницы	73.7	0.75	98	5.4	1360	13.9
Воскресенск	82.7	1.21	68	6.9	1200	17.5
Коломна	82.4	1.00	82	7.7	1070	13.0

отношение Sr : Ba выше 10. Отношение Ca : Ba смещения не дает. Таким образом, можно считать, что показателем загрязненности воды сточными водами в некоторых случаях может служить отношение Ca : Sr.

Выводы

1. Содержание металлов в воде р. Москвы выше сбросов городских сточных вод не превышает фоновых величин.
2. Ниже города содержание металлов резко возрастает, превышая по меди и никелю в 1.5—3 раза допустимые концентрации для водоемов санитарно-бытового пользования и в 10—14 раз допустимые концентрации для водоемов рыбохозяйственного назначения. Значительное превышение допустимой концентрации наблюдается для железа и марганца.
3. Высокие концентрации металлов в воде р. Москвы прослеживаются вплоть до устья, распространяясь ниже выпуска стоков на расстояние, превышающее 150 км.
4. Металлы, не связанные с терригенным смывом, находятся преимущественно в растворенном и тонкодисперсном состоянии.
5. Основным источником поступления металлов в реку являются внутригородские промышленные стоки. После смешения речной воды ниже города со сточными водами, прошедшими очистку на городских станциях аэрации, содержание металлов в воде реки снижается.

ЛИТЕРАТУРА

- Д р а ч е в С. М. 1964. Борьба с загрязнением рек, озер и водохранилищ промышленными и бытовыми стоками. Изд. «Наука», М.—Л.
- Е в р о п е й с к и е нормы качества питьевой воды. 1963. Всемирная организация здравоохранения. Дворец наций. Женева.
- З а в о д н о в С. С., Е. Е. Л о б ч е н к о, Н. Г. Ф е с е н к о. 1965. О загрязнении медью и цинком рек Северной Осетии и процессах их самоочищения. Гидрохим. материалы, т. 40.
- К о л ь ц о в Г. В. 1965. Распределение редких и рассеянных элементов в воде Рыбинского водохранилища осенью 1961 г. В сб.: Динамика водных масс водохранилищ. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7.
- К о н о в а л о в Г. С., А. А. И в а н о в а, С. В. Ш у л ь м и н а, Н. И. К а т а л е в с к и й. 1965. Некоторые рассеянные элементы в бассейнах рек Волги и Камы. Гидрохим. материалы, т. 40.
- М а л ю г а Д. П. 1945. К содержанию меди, никеля, кобальта и других элементов семейства железа в природных водах. ДАН СССР, т. 48, № 2.
- С а н и т а р н а я охрана водоемов от загрязнения промышленными сточными водами. 1964, вып. 6, изд. «Медицина», М.
- С а н и т а р н а я охрана водоемов от загрязнения промышленными сточными водами. 1965, вып. 7, изд. «Медицина», М.
- С е р е д а Г. А. и Ц. И. Б о б о в н и к о в а. 1965. Стронций в пресных водоемах. Гидрохим. материалы, т. 39.

МИНЕРАЛЬНЫЙ И ОРГАНИЧЕСКИЙ ФОСФОР В ВОДЕ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА В 1965 г.

Настоящая работа посвящена выяснению закономерностей сезонной динамики фосфора как одного из биогенных элементов в водах Рыбинского водохранилища. Работы по определению органического фосфора на Рыбинском водохранилище не проводились; данные по распределению

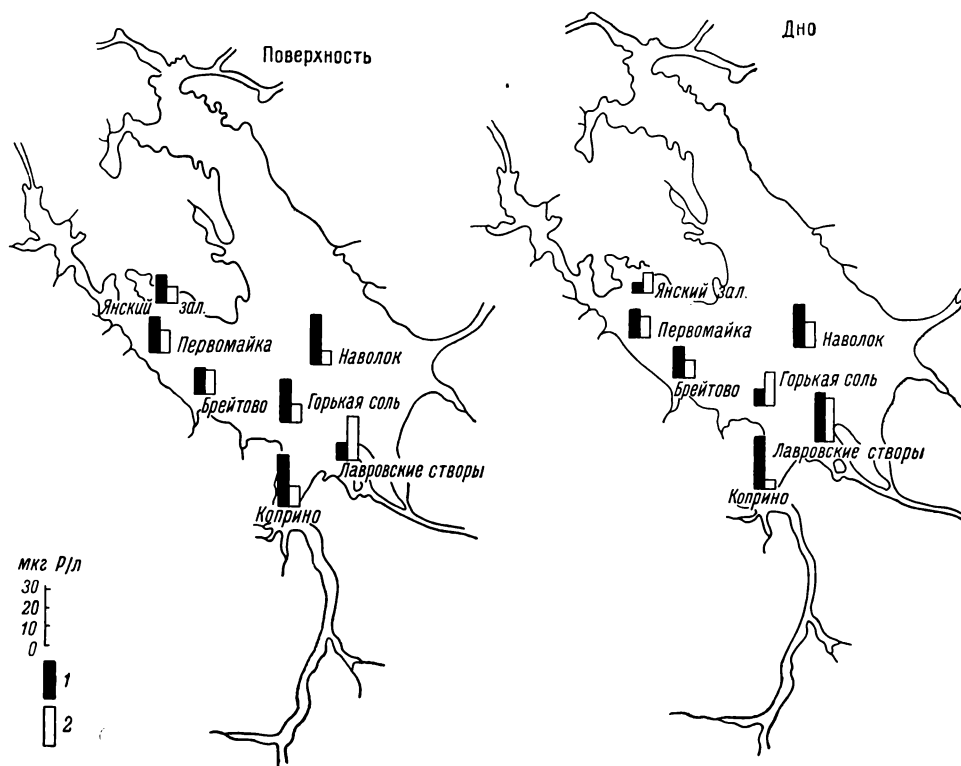


Рис. 1. Распределение минерального и органического фосфора в воде Рыбинского водохранилища в марте 1965 г.

1 — минеральный фосфор; 2 — органический фосфор.

фосфатов имеются в работах Д. Д. Кудрявцева (1950), А. П. Щербакова (1950), П. П. Воронкова (1951, 1953), Н. А. Мосевича и М. В. Мосевич (1954), А. С. Киреевой (1956), Н. И. Аничковой (1959).

Определение минерального и органического фосфора производилось нами в марте, мае, июле и октябре 1965 г. Пробы отбирались во время рейсов по водохранилищу с двух горизонтов: 0.5 м от поверхности и 0.5 м

от дна. Определения pH , O_2 , CO_2 , общего и минерального фосфора делались в натуральной воде. Содержание фосфора определялось по методике, описанной Б. А. Скопинцевым и др. (1963).

В марте (рис. 1) содержание общего фосфора по всем станциям колебалось в пределах от 23 до 37 мкг Р/л в поверхностном и придонном слоях. Исключение составляли станции в Янском заливе (15 мкг Р/л) и у Лавровских створов (49 мкг Р/л у дна).

Самое низкое содержание минерального фосфора отмечено в придонных слоях на станциях Янский залив (5 мкг Р/л), Горькая соль

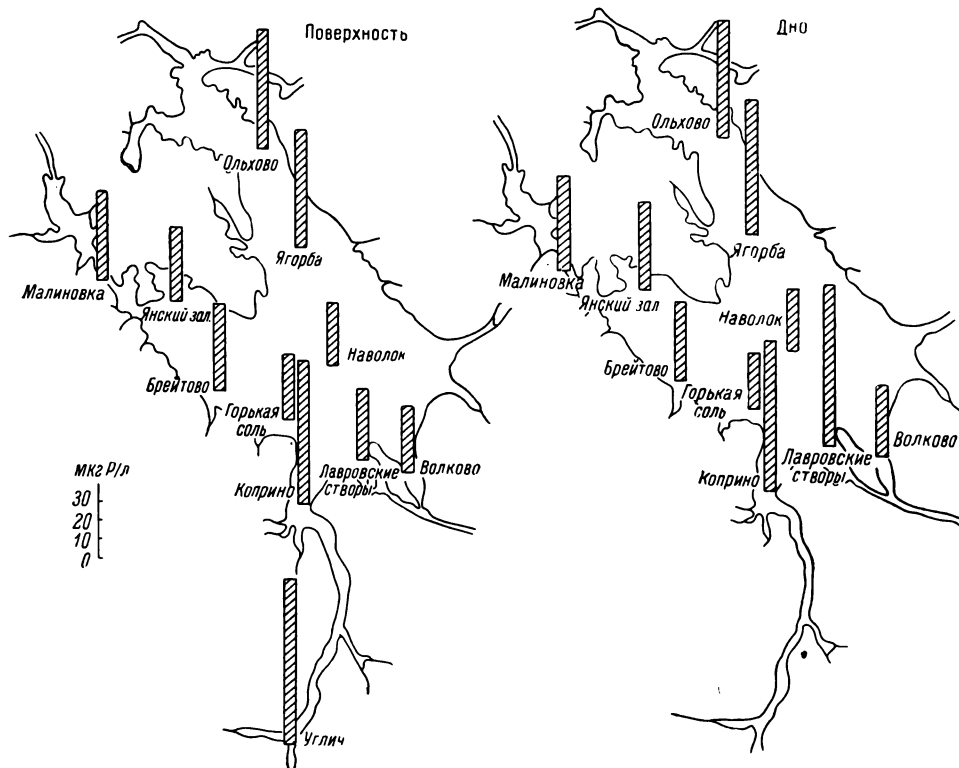


Рис. 2. Распределение общего фосфора в воде Рыбинского водохранилища в мае 1965 г.

(8 мкг Р/л), в поверхностном слое у Лавровских створов (10 мкг Р/л). В Моложском отроге оно составляло в среднем 15, в центральной части водохранилища и у Коприна около 26 мкг Р/л.

Количество органического фосфора у поверхности было примерно одинаковым для всех станций (10 мкг Р/л), кроме Лавровских створов (23 мкг Р/л). Доля органического фосфора в общем варьировала от 19 до 70% в поверхностном слое и от 35 до 68% в придонном.

В мае (рис. 2) определялось лишь содержание общего фосфора. Было отмечено значительное (в 1.8—2 раза) увеличение его в Моложском и Волжском отрогах, что, очевидно, связано с поступлением талых вод. В Шекснинском отроге (станции Ольхово и Ягорба) оно в среднем равнялось 63 мкг Р/л. В центральной части водохранилища существенных изменений по сравнению с мартом не наблюдалось.

В июле (рис. 3) концентрация общего фосфора уменьшилась как в поверхностном слое, так и в придонном; увеличение ее отмечено у Лавровских створов и Ольхова (у поверхности) и у Брейтова (у дна); у Коприна она почти не изменилась.

В связи с сильным цветением синезеленых водорослей в этот период количество минерального фосфора в поверхностных слоях снизилось в Центральной части до 0.2, в Шекснинском отроге до 2—4, у Брейтова до 6.5 мкг Р/л.

Количество органического фосфора увеличилось по сравнению с мартом в центральной части в 4 раза, у Коприна в 3 раза, в Моложском отроге незначительно. По отношению к общему фосфору органический составил

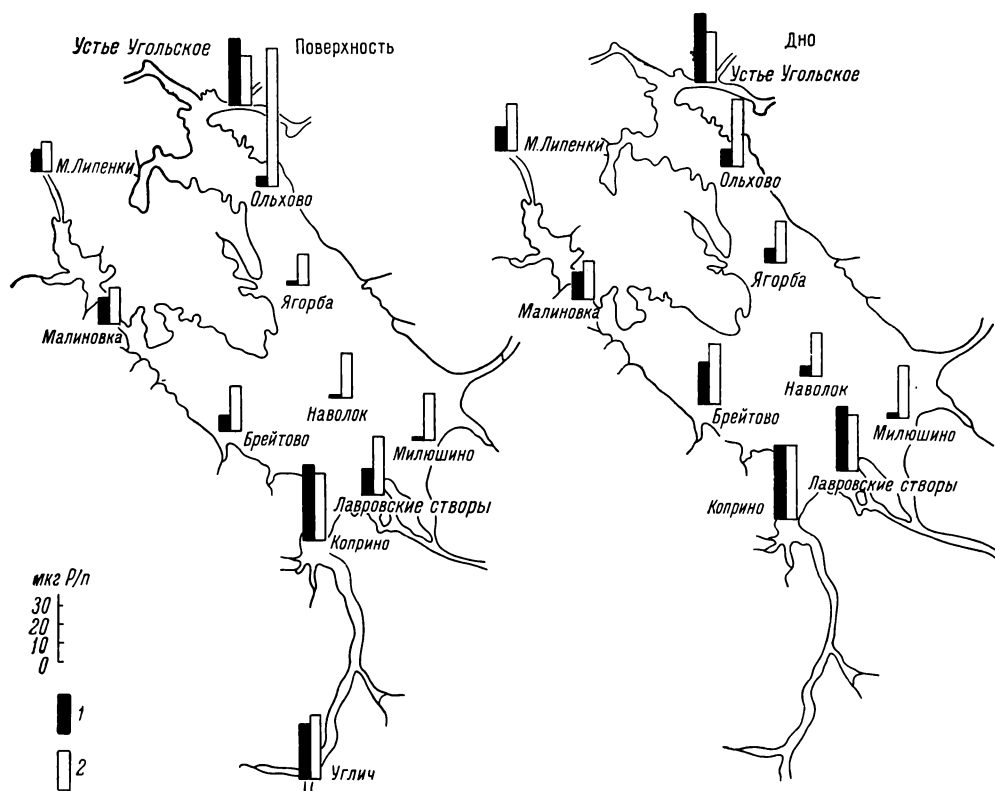


Рис. 3. Распределение минерального и органического фосфора в воде Рыбинского водохранилища в июле 1965 г.

Обозначения те же, что на рис. 1.

от 42 до 99%. Наибольшее количество его отмечено на станции Ольхово (73 мкг Р/л), на остальных станциях оно колебалось от 14 до 39 мкг Р/л.

В октябре (рис. 4) содержание общего фосфора увеличилось по сравнению с июлем, в особенности у Наволока: в 2 раза у поверхности и в 2.5 раза у дна. Снижение его зарегистрировано на станциях Коприно и Ольхово (на обоих горизонтах) и на станции Брейтово (у дна). Только у Наволока количество общего фосфора превысило отмеченное в мае. На остальных пунктах оно было меньше.

Минеральный фосфор определялся только на четырех станциях: Углич, Коприно, Брейтово и Наволок. Здесь произошло увеличение содержания минерального фосфора (незначительное снижение лишь в придонном слое у Брейтова) и снижение концентрации органического фосфора (увеличение отмечено у Наволока и в поверхностном слое у Брейтова).

К сожалению, в исследованных пробах воды не производилось определение органического углерода, а, как известно, величины отношений

С : N и С : Р имеют определенное значение при оценке состава органического вещества.

Но в то же время мы имеем данные по перманганатной окисляемости,¹ а величина отношения $\frac{\text{О перманганатной окисляемости}}{\text{С органический}}$ в среднем близка к 1.0 с крайними отклонениями от 0.65 до 1.3 для различных водоемов в зависимости от происхождения органического вещества (Крылова

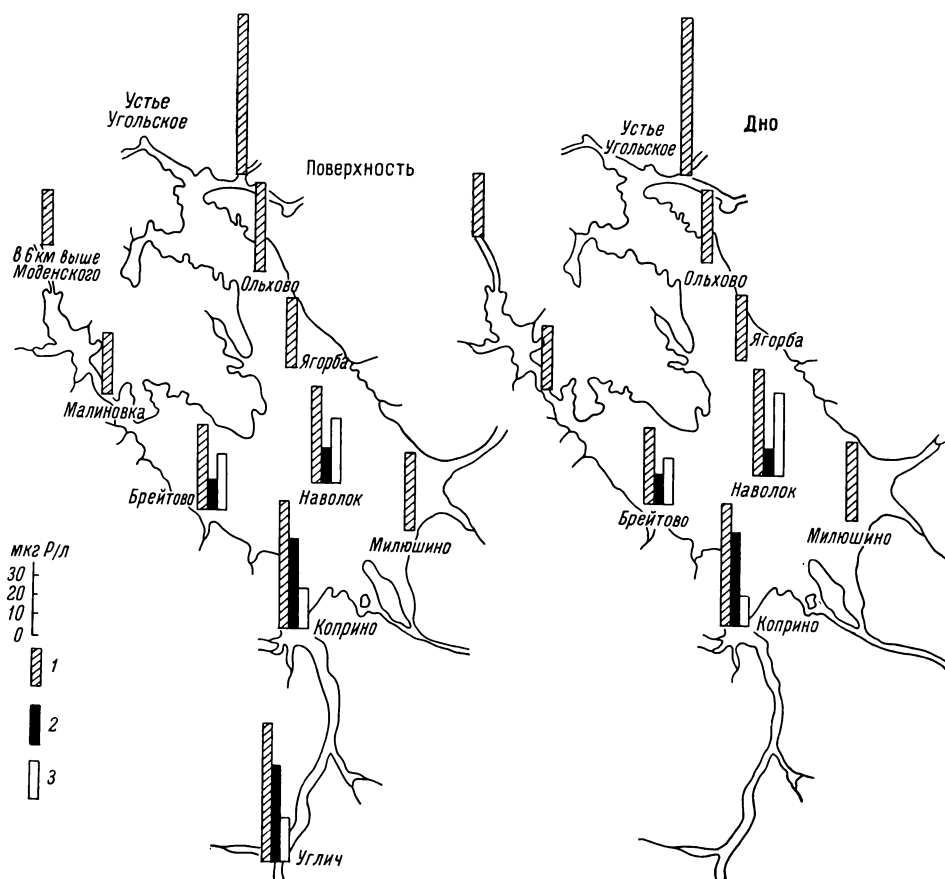


Рис. 4. Распределение общего, минерального и органического фосфора в воде Рыбинского водохранилища в октябре 1965 г.

1 — общий фосфор; 2 — минеральный фосфор; 3 — органический фосфор.

и Скопинцев, 1959). Величины рассматриваемого отношения для Рыбинского водохранилища равны 1.2—1.4 для февраля и 0.9—1.1 для остальных сезонов (Скопинцев и Бакулина, 1966).

Если с определенным допущением принять, что в соответствующие сезоны 1965 г. величины отношения $\frac{\text{О перманганатной окисляемости}}{\text{С органический}}$ близки к полученным в 1964 г., то представляется возможность вычислить содержание органического углерода для тех сезонов, когда определялась перманганатная окисляемость. Эти данные, а также рассчитанные значения С : Р приведены в таблице. В среднем величина отношения С : Р была равной 517 для июля и 393 для октября, что согласуется с пределами колебаний этой величины (от 150 до 500), вычисленной для

¹ Данные гидрохимической лаборатории.

большого ряда висконсинских озер (Скопинцев, 1950). Наибольшие величины отношения С : Р характерны для вод, богатых окрашенными органическими веществами.

Сопоставление содержания органического фосфора с расчетным содержанием органического углерода

Пункт наблюдений	О перманганатный С органический	Перманганатная окисляемость, мг O ₂ /л	С органический, мг/л	Р органический, мг/л	С органический Р органический
Июль					
Коприно	1.0	13.8	13.8	0.035	394
	0.95	14.6	15.4	0.039	395
М. Липенки	1.1	18.3	16.7	0.014	1193
	1.3	18.0	13.8	0.023	600
Малиновка	1.1	16.5	15.0	0.018	833
	1.3	16.1	12.4	0.019	653
Брейтово	1.0	10.4	10.4	0.023	452
	0.9	10.9	12.1	0.032	378
Ольхово	1.1	13.0	11.8	0.073	162
	1.0	13.0	13.0	0.035	371
Ягорба	1.1	10.0	9.1	0.018	505
	1.0	10.4	10.4	0.021	495
Наволоок	1.0	12.0	12.0	0.023	522
	0.9	13.3	14.8	0.020	740
Милюшино	1.0	10.0	10.0	0.024	417
	0.9	10.1	11.2	0.026	431
Лавровские створы	1.0	10.4	10.4	0.030	347
	0.95	11.7	12.3	0.029	424
Октябрь					
Коприно	1.15	12.4	10.8	0.021	514
	1.3	12.4	9.5	0.016	594
Брейтово	1.1	11.0	10.0	0.0295	339
	1.1	11.2	10.1	0.025	404
Наволоок	1.1	11.0	10.0	0.034	294
	1.1	10.5	9.5	0.045	211

В заключение следует отметить, что в связи с ограниченным числом станций и большим разрывом в сроках наблюдений охарактеризовать динамику фосфора в Рыбинском водохранилище можно лишь в общих чертах: увеличение содержания общего и органического фосфора от весны к лету, снижение содержания минерального фосфора в летний период и увеличение его осенью.

Полученные данные свидетельствуют о том, что содержание минерального фосфора не может лимитировать развития фитопланктона в Рыбинском водохранилище, поскольку величина его бывает близкой к аналитическому нулю лишь в отдельных участках в период наиболее интенсивного развития фитопланктона, что уже отмечалось П. П. Воронковым (1953), Н. А. Мосевичем и М. В. Мосевич (1954), Н. И. Аничковой (1959).

ЛИТЕРАТУРА

- А н и ч к о в а Н. И. 1959. Некоторые черты гидрохимического режима северной части Рыбинского водохранилища. Тр. Дарв. гос. зап., вып. 5.
- В о р о н к о в П. П. 1951. Основные черты формирования гидрохимического режима Рыбинского водохранилища. Тр. Гос. гидрол. инст., вып. 11.
- В о р о н к о в П. П. 1953. Основные черты режима биогенных соединений водохранилищ волжской системы в связи с их первичной продукцией. Тр. Гос. гидрол. инст., вып. 37.
- К и р е е в а А. С. 1956. Некоторые данные по гидрохимии Рыбинского водохранилища. Тр. биол. ст. «Борок», вып. 2.
- К р ы л о в а Л. А. и Б. А. С к о п и н ц е в. 1959. Содержание органического углерода в водах рек и озер Подмосковья и крупных реках Советского Союза. Гидрохим. материалы, т. 28.
- К у д р я в ц е в Д. Д. 1950. Сравнительная характеристика гидрохимического режима водохранилищ Верхней Волги: Ивановского, Угличского и Рыбинского. Тр. биол. ст. «Борок», вып. 1.
- М о с е в и ч Н. А. и М. В. М о с е в и ч 1954. Основные черты гидрохимического режима и микробиологические процессы в Рыбинском водохранилище. Тр. проблемных и тематических совещаний, вып. 2.
- С к о п и н ц е в Б. А. 1950. Органическое вещество в природных водах (водный гумус). Тр. ГОИН, вып. 17.
- 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. В сб.: Продуцирование и круговорот органического вещества во внутренних водоемах, изд. «Наука», М.—Л.
- С к о п и н ц е в Б. А., А. В. К а р п о в, С. Н. Т и м о ф е е в а. 1963. Опыт применения автоклава для минерализации органического вещества природных вод. Гидрохим. материалы, т. 35.
- С к о п и н ц е в Б. А., А. В. К а р п о в, С. Н. Т и м о ф е е в а. Опыт применения автоклава для минерализации органического вещества природных вод. Гидрохим. материалы, т. 35.
- Щ е р б а к о в А. П. 1950. Гидрохимический режим рек Волги, Мологи, Шексны в районе Рыбинского водохранилища (до наполнения водохранилища). Тр. биол. ст. «Борок», вып. 1.
-

О СОДЕРЖАНИИ АМИНОКИСЛОТ В ВОДЕ РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Сбор материала производился в шести рейсах по Рыбинскому водохранилищу: 9 VI и 3 XI 1964 и с 22 по 30 III, с 11 по 20 V, с 18 по 27 VII и с 20 по 29 X 1965. На русле Волги у Коприна отбор проб производился несколько чаще. Станции отбора проб были расположены по всему водохранилищу и охватывали как центральную часть, так и верховья плесов. Расположение станций приведено на схеме (рис. 1). Пробы отбирались с поверхности и с глубины 0.5 м от дна. Обработка проб в навигационный период начиналась сразу же после их отбора. Зимой начало обработки несколько задерживалось, но не больше чем на 10—12 час.

Определение суммарного количества свободных аминокислот производилось по несколько видоизмененному методу А. Д. Семенова и др. (1962). Сущность этого метода заключается в деминерализации природных вод и концентрировании свободных аминокислот с помощью катионита КУ-2, элюировании аминокислот с катионита раствором аммиака, выпаривании элюата и проведении при нагревании в водно-бутанольной среде и в присутствии солей кадмия реакции взаимодействия аминокислот с нингидрином. Получаемое в результате этой реакции окрашенное соединение (дикетогидринделидендикетогидринамин) фотометрируется, и по калибровочной кривой определяется суммарное количество свободных аминокислот, содержащихся в пробе воды.

При освоении этой методики и применении ее к водам Рыбинского водохранилища встретился ряд затруднений.

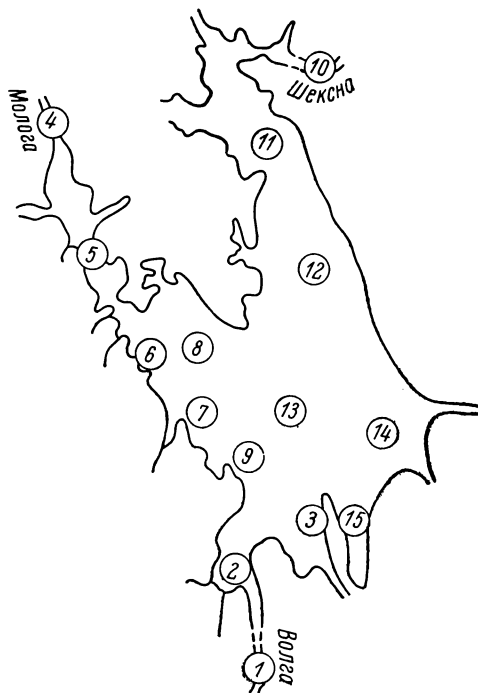


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб на Рыбинском водохранилище.

1 — выше Углича; 2 — у Коприна; 3 — у Лавровских створов; 4 — выше Весьегонского расширения; 5 — у руч. Малиновка; 6 — у пристани Первомайка; 7 — в районе Брейтова; 8 — в Янском заливе; 9 — у затопленного с. Горькая Соль; 10 — у с. Усть-Угольское; 11 — у затопленного Ольхова; 12 — у затопленного шлюза Ягорба; 13 — у затопленного Наволока; 14 — к юго-западу от затопленного Мормужина; 15 — в сбросном плесе, выше Волкова.

В нашей практике подготовка катионита путем проведения рекомендованной названными авторами «тренировки», т. е. пяти-, шестикратного повторения последовательного пропуска через колонку с катионитом 100 мл двунормального раствора аммиака, 0.5 л воды, 100 мл однонормального раствора соляной кислоты, 0.5 л воды,¹ оказалась недостаточной. При подготовке катионита таким способом поправка на холостой опыт оказалась в несколько раз большей, чем предполагаемое в природной воде содержание свободных аминокислот, а результаты анализа стандартных растворов превышали истинное содержание в них аминного азота в среднем в 2 раза.

В дальнейшем подготовку катионита мы производили по В. Л. Карпову (1962). Получив нужную фракцию катионита (0.25—0.50 мм) просеиванием через сито и удалением более мелких частиц путем отмучивания, нагревали его с двунормальным раствором щелочи на водяной бане при температуре 80° в течение 2 час. Затем в высокой делительной воронке или широкой хроматографической колонке промывали катионит сначала водой, потом четырехнормальной соляной кислотой до отрицательной реакции на ионы железа, и снова водой до pH 5 по смешанному индикатору. При такой обработке катионита поправка на холостой опыт снизилась до 0.5 мкг N на пробу. При определении содержания аминного азота в стандартных растворах аминокислот отклонения от истинных величин составляли $\pm 8.5\%$ при низком и среднем содержании аминокислот и $\pm 15\%$ при высоком (около 100 мкг N в пробе).

Регенерирование катионита после пропуска проб производилось следующим образом: после элюирования аминокислот двунормальным раствором аммиака катионит промывался водой (критерий чистоты — отсутствие окраски элюата при добавлении фенолфталеина), затем 1 н раствором HCl до исчезновения следов аммиака, что проверялось реактивом Несслера, и вновь водой до pH 5 по смешанному индикатору. При использовании катионита, регенерированного таким образом, поправка на холостой опыт составляет 0.4—0.6 мкг N/л, определение содержания аминокислот в стандартных растворах и параллельных пробах дает отклонение от средних величин на $\pm 10\%$.

Авторы методики, использованной нами (Семенов и др., 1962) при проведении нингидриновой реакции, рекомендуют нагревать колбочки с пробами на кипящей водяной бане, а потом доводить объем фотометрируемого спиртового слоя до 6 мл. В нашей практике оказалось, что в пробах, нагревавшихся на спокойно кипящей водяной бане, объем так называемого спиртового слоя, состоящего из водонасыщенного бутанола, превышал 6 мл. На бурно кипящей водяной бане объем спиртового слоя в пробах меньше 6 мл, но объемы спиртового слоя проб очень отличались друг от друга. На графике, построенном по стандартным растворам, обработанным таким образом, получался слишком большой разброс точек (в среднем 24%).

Нагревание проб в термостате (15 мин. при 115°) показалось нам более удобным. При этом объем проб практически не менялся, что позволило приливать сразу весь объем используемого бутанола. Этот прием повысил точность определений, о чем свидетельствует уменьшение разброса точек на кривой в среднем до 7—8%, и упростил ход анализа.

При проведении нингидриновой реакции необходимо для проб выбрать в термостате постоянные места с одинаковой температурой нагрева.

Оттенок и интенсивность окраски проб в некоторой степени зависят от количества приливаемого раствора хлористого кадмия. В своей работе

¹ NH_4OH и HCl , используемые для промывки катионита, подвергались перегонке, а вода везде использовалась дважды перегнанная.

насыщенный раствор CdCl_2 мы приливали всегда в количестве 1 капли, и использовали 30%-й раствор сегнетовой соли. Увеличение объема бутанола до 10 мл позволило использовать для фотометрирования кюветы большего размера.

Эти небольшие изменения в проведении нингидриновой реакции сделали методику более удобной и повысили интенсивность окраски фотометрируемого слоя проб на 20—25%.

Была сделана попытка разделения свободных аминокислот с помощью бумажной хроматографии. В качестве растворителя была использована смесь: н-бутанол, уксусная кислота и вода в отношении 4 : 1 : 5. Проявлялись хроматограммы изатином по А. Н. Бояркину (1958). Четкому разделению свободных аминокислот мешают окрашенные органические

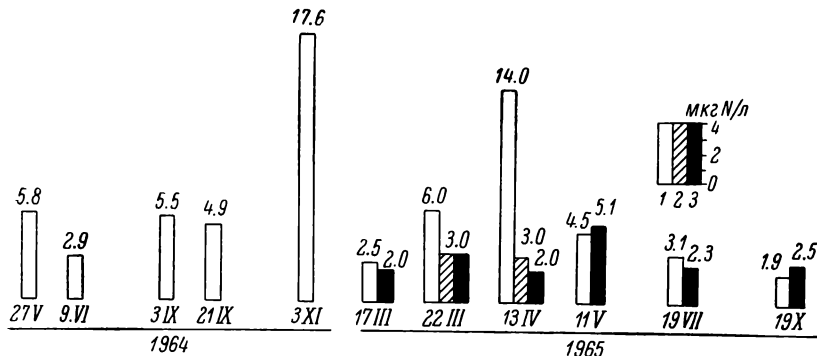


Рис. 2. Результаты наблюдений за содержанием свободных аминокислот у Коприна.

1 — поверхность; 2 — средний горизонт; 3 — придонный горизонт.

вещества, содержащиеся в воде. Часть их адсорбируется на катионите КУ-2 и элюируется с катионита аммиаком вместе с аминокислотами.

Чтобы не загрязнять колонки с катионитом взвесями, содержащимися в воде, проба перед определением свободных аминокислот фильтровалась через стеклянный фильтр № 3. Фильтрование проб через более плотный стеклянный фильтр № 4 со слоем сернокислого бария не оказывает существенного влияния на результаты анализа свободных аминокислот.

В нескольких пробах июльского рейса произведено определение аминокислот в гидролизатах органического вещества, содержащегося в воде. Гидролиз органического вещества производился раствором 6 н. HCl при кипячении на водяной бане в течение 24 час. Аминокислоты в гидролизате определялись также по методу А. Д. Семенова и др. (1962) с указанными выше изменениями.

В пробах воды помимо аминокислот производилось определение электропроводности, цветности, перманганатной и бихроматной окисляемости, рН, прозрачности, мутности, содержания азота — органического и минеральных форм: нитратного, нитритного и аммонийного. По хлорофиллу, определенному в ацетоновой вытяжке из взвесей, содержащихся в воде, оценивалось примерное количество фитопланктона.

Результаты определения свободных аминокислот, содержащихся в воде Рыбинского водохранилища, приведены в таблице, а результаты определения содержания аминокислот в воде у Коприна — на рис. 2.

Как видно из таблицы, содержание свободных аминокислот в Рыбинском водохранилище невелико. Оно колеблется от 0 до 19 мкг N/л, что составляет до 2% органического азота.

Содержание свободных аминокислот в воде Рыбинского водохранилища

№ стан-ции	Место отбора проб	Горизонт	1964 г.		1965 г.			
			VI	XI	III	V	VII	X
			свободные аминокислоты, мкг N/л					
1	Выше Углича	Поверхность	—	—	—	3.4	2.9	2.4
2	У Коприна	»	2.9	17.6	6.0	4.5	3.1	0.9
		Дно	—	—	3.0	5.1	2.3	1.5
3	У Лавровских створов	Поверхность	—	—	5.0	5.4	3.6	—
		Дно	—	—	2.0	3.9	2.9	—
4	Выше Вельегонского расширения	Поверхность	—	—	—	—	1.8	1.1
		»	0.9	6.0	—	2.2	1.8	—
5	У руч. Малиновка	Дно	—	—	—	2.3	1.8	—
6	У Первомайки	Поверхность	—	—	1.0	—	—	—
		Дно	—	—	0.0	—	—	—
7	В районе Брейтова	Поверхность	1.9	4.6	2.0	3.9	2.3	2.1
		Дно	—	—	0.5	8.9	1.7	4.0
8	В Янском заливе	Поверхность	2.5	—	1.0	3.1	—	—
		Дно	—	—	7.0	2.6	—	—
9	У затопленного с. Горькая Соля	Поверхность	1.9	4.0	6.0	3.2	—	—
		Дно	—	—	4.0	3.4	—	—
10	У с. Усть-Угольское	Поверхность	—	—	—	—	6.0	2.0
11	У затопленного Ольхова	»	4.4	19.3	—	1.2	2.2	—
		Дно	—	—	—	1.6	3.8	—
12	У затопленного плеса Ягорба	Поверхность	6.8	10.1	—	2.1	3.0	2.0
		Дно	—	—	—	4.4	4.2	3.3
13	У затопленного Наволока	Поверхность	4.8	5.5	13.0	3.7	2.2	2.2
		Дно	—	—	13.0	4.7	1.0	2.6
14	К ю.-з. от затопленного Мормужина	Поверхность	2.2	—	—	5.0	—	—
		»	3.7	4.3	—	2.9	2.9	2.2
15	В сбросном плесе, выше Волкова	Дно	—	—	—	3.4	3.8	1.9

В марте 1965 г. по химическому составу в обследованном нами районе водохранилища можно было выделить 3 типа вод: моложские, волжские и воды центральной части водохранилища. Моложские воды характеризовались наибольшей цветностью (66—82°), низким содержанием минеральных форм азота (0.09—0.17 мг N/л) и несколько пониженной по сравнению с другими частями водохранилища электропроводностью (265—294 мксим./см). В волжских водах наблюдалась низкая цветность (24—37°), самая большая электропроводность (296—386 мксим./см) и высокое содержание азота, в том числе и минеральных его форм (0.72—1.02 мг N/л). В водах центральной части водохранилища цветность наблюдалась порядка 30—50°, электропроводность и содержание азота были ниже, чем в волжских водах. Минеральные формы азота представлены нитратами.

На обследованном нами участке водохранилища в марте моложские воды занимали районы Первомайки (ст. 6), Брейтова (ст. 7) и поверхностные слои Янского залива (ст. 8). Центральные воды — район Наволока (ст. 13), придонные слои в Янском заливе (ст. 8) и поверхностные у Лавровских створов и Горькой Соли (ст. 3 и 9). Волжские воды были у Коприна (ст. 2) и в придонных слоях у Горькой Соли и Лавровских створов (ст. 9 и 3).

Такое распределение водных масс в марте вполне соответствует опубликованным данным о распределении водных масс и течениях в Рыбинском водохранилище (Буторин и Литвинов, 1963; Курдина и Буторин, 1968).

Распределение аминокислот в это время хорошо согласовалось с распределением водных масс. В цветных моложских водах содержание аминокислот было наименьшим (от 0 до 2 мкг N/л). Наибольшим содержанием аминокислот отличались воды центральной части водохранилища (5—13 мкг N/л). В волжских водах содержание аминокислот составляло 2—6 мкг N/л.

В наименее цветных водах Волжского плеса, в пробах, отобранных в феврале—апреле 1965 г. у Коприна, были обнаружены следующие аминокислоты: лейцин, глицин, валин, аргинин, лизин, аспарагиновая и глутаминовая кислоты.

В мае в центральной части водохранилища в результате разбавления зимних вод талыми содержание аминокислот несколько понизилось. В верховьях плесов в это время находились маломинерализованные полые воды с низким содержанием аминокислот. Наиболее же низким содержанием аминокислот отличались, как и в марте, моложские воды и высокоцветные (цветность около 100°) воды, поступившие в р. Шексну и обнаруженные нами у Ольхова.

К июлю значительно возросло содержание в воде органического азота. Количество его в этот период колебалось от 0.8 до 2.3 в натуральной воде и от 0.7 до 1.6 мг N/л в фильтрованной, что составляло от 74 до 96% общего содержания азота. Количество минеральных форм азота — нитратов и аммиака — чаще всего измерялось сотыми долями мг N/л, а иногда снижалось и до 0. Вместе с тем содержание свободных аминокислот снизилось по всей акватории водохранилища.

В нескольких пробах воды, взятых в июле на Рыбинском водохранилище, было определено суммарное количество аминокислот в кислых гидролизатах органического вещества. Анализы показали, что аминокислоты содержатся в количестве от 30 до 400 в гидролизатах натуральной воды и от 30 до 120 мкг N/л в гидролизатах фильтрованной, что составляет от 2.5 до 17.5% содержания органического азота. Наименьшее количество аминокислот в гидролизате органического вещества наблюдалось также в моложских водах, максимальное — у Ольхова (ст. 11), при интенсивном цветении синезеленых водорослей (содержание хлорофилла 47 мкг/л). Но и при высоком содержании аминокислот в гидролизатах концентрация свободных аминокислот в воде у Ольхова оставалась низкой, особенно у поверхности (2 мкг N/л), что составляло лишь 0.5% аминокислот гидролизата. Это минимальная величина для водохранилища.

В октябре 1965 г. воды Рыбинского водохранилища по химическому составу были довольно однородными почти по всему водоему. Несколько отличались лишь верховья плесов. Содержание свободных аминокислот было низким и также довольно однообразным по всему водохранилищу.

В таблице приведены данные о содержании свободных аминокислот в начале июня и ноября 1964 г. При сравнении их с данными 1965 г. видно, что в весенний период содержание свободных аминокислот в эти годы довольно сходно. В осенние же периоды в содержании аминокислот наблюдаются различия, превышающие сезонные изменения.

Изменения в содержании свободных аминокислот в затопленном русле Волги у Коприна, где наблюдения производились несколько чаще, чем на других участках водохранилища, показаны на рис. 2, из которого видно, что сезонные изменения содержания аминокислот не носят строго определенного характера. Небольшое увеличение содержания свободных аминокислот в русле Волги наблюдалось в позднеосенний период и перед вскрытием водоема.

Мы попытались сравнить результаты наших наблюдений с данными, опубликованными в печати. Сравнение несколько условное, поскольку ни в одной из отечественных работ (Семенов и др., 1962; Майстренко,

1964, 1965; Власова, 1965; Дацко и др., 1965; Ивлева и Дацко, 1965) не указаны сроки обработки проб, время и условия хранения, тогда как эти факторы могут существенно влиять на результаты анализа.

Содержание свободных аминокислот в Рыбинском водохранилище выражается величинами того же порядка, что и в Веселовском водохранилище по данным И. Н. Ивлевой и В. Г. Дацко (1965). В этой работе приведены также результаты нескольких определений содержания аминокислот в Горьковском, Куйбышевском и Волгоградском водохранилищах. Эти величины также сходны с нашими. По данным В. Г. Дацко и др. (1965), содержание аминокислот в Старо-Бешевском, сильно загрязненном водохранилище, на один порядок выше, чем в Рыбинском водохранилище.

Выводы

1. Свободные аминокислоты содержатся в воде Рыбинского водохранилища в количестве от 0 до 19 мкг N/л. Наибольшее различие в содержании свободных аминокислот в разных частях водохранилища наблюдается в осенне-зимний период.

2. Наименьшим содержанием аминокислот отличаются, как правило, воды с высоким содержанием окрашенного органического вещества.

3. Сезонные изменения содержания аминокислот не носят строго определенного характера. Небольшое увеличение их содержания наблюдалось в позднеосенний период и перед вскрытием водоема.

ЛИТЕРАТУРА

- Б о я р к и н А. Н. 1958. Дополнительно о проявлении аминокислот изатином на бумажных хроматограммах. Физиология растений, т. 5, № 1.
- Б у т о р и н Н. В. и А. С. Литвинов. 1963. О течениях в Рыбинском водохранилище. В сб.: Биологические аспекты изучения водохранилищ, Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 6.
- В л а с о в а Т. А. 1965. О содержании органического углерода, органического азота, аминокислот и редуцирующих сахаров в некоторых водоемах северо-востока европейской территории СССР. Гидрохим. материалы, т. 39.
- Д а ц к о В. Г., Л. И. Немцева, А. Д. Семенов, В. Л. Васильева и Т. С. Кишкинова. 1965. О качественном составе органических веществ в воде Старо-Бешевского водохранилища. Гидрохим. материалы, т. 40.
- И в л е в а И. Н. и В. Г. Дацко. 1965. О качественном составе органических веществ в природных водах на примере отдельных водоемов. Гидрохим. материалы, т. 40.
- К а р п о в В. Л. 1962. Применение отечественных ионообменных смол и бумажной хроматографии для анализа свободных аминокислот, меченных углеродом. В сб.: Методика количественной бумажной хроматографии сахаров, органических кислот и аминокислот у растений, Изд. АН СССР, М.—Л.
- К у р д и н а Т. Н. и Н. В. Буторин. 1968. Гидрологические условия и зимние уловы в водохранилище. В сб.: Биологические и гидрологические факторы местных перемещений рыб в водохранилищах, изд. «Наука», М.—Л.
- М а й с т р е н к о Ю. Г. 1964. Методика определения органического вещества природных вод. В сб.: Радиоактивные изотопы в гидробиологии и методы санитарной гидробиологии, изд. «Наука», М.—Л.
- М а й с т р е н к о Ю. Г. 1965. Об изучении свободных α -аминокислот в воде водоемов Украины. Гидробиологический журнал, № 1.
- С е м е н о в А. Д., И. Н. Ивлева и В. Г. Дацко. 1962. Концентрирование и определение аминокислот в пресных водах и гидролизатах. В сб.: Современные методы анализа природных вод, Изд. АН СССР, М.

СОДЕРЖАНИЕ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ ВЕРХНЕЙ ВОЛГИ

Содержание радиоактивных продуктов ядерных взрывов в водохранилище в значительной степени определяется гидрологическим режимом водоема и в первую очередь ролью атмосферных осадков в питании реки. Как известно, основным источником питания Волги являются снеговые талые воды, составляющие 65—70% годового стока. После зимней сработки уровня волжские водохранилища заполняются весенними водами поверхностного стока, содержащими повышенное количество радиоактивных веществ. Относительно высокий уровень радиоактивности талых вод обусловлен накоплением радиоактивных выпадений в снеговом покрове площади водосбора реки.

Дальнейшая судьба радиоактивных продуктов, поступивших в водохранилища с поверхностными водами, зависит от коэффициента зарегулированности стока, определяющего продолжительность задержки паводочных вод в водохранилище, и участия продуктов деления в обменных процессах. Наряду с химическими превращениями, зависящими от свойств радиоактивного изотопа и формы, в которой он находится, важным фактором распределения являются биологические процессы. Поглощение радиоактивных изотопов водными организмами не только обуславливает снижение уровня радиоактивности воды, но и способствует их накоплению в донных отложениях водохранилищ.

Некоторые продукты деления, обладая высокой сорбционной способностью, поступают в водохранилища вместе со взвешенными веществами. Если эти радиоактивные изотопы усиленно поглощаются водными организмами, то содержание и распределение их в донных отложениях водоема отчасти будут характеризовать интенсивность участия аллохтонной взвеси в биохимических процессах водоема. В связи с этим изучение распределения такого рода продуктов деления представляет особый интерес.

Методика отбора и обработки проб и измерения активности

Материалом для настоящего сообщения послужили результаты анализа проб воды и донных отложений, отобранных на Иваньковском, Угличском, Рыбинском и Горьковском водохранилищах летом 1965 г.

Отбор проб воды производился батометром Рутнера с горизонта, 0.6 h. Донные отложения отбирались с помощью илососа Перфильева, что позволяло собрать верхний тонкодисперсный слой отложений. Отобранная проба наилка отстаивалась в течение 8 мин. в стакане объемом 0.5 л, затем верхний 10 см слой жидкого ила отделялся от осадка путем сифонирования. При такой продолжительности отстоя отсифонированная часть

пробы содержала частицы диаметром менее 0.01 мм. Анализ подвергалась исходная проба и отсифонированная тонкодисперсная фракция ила.

Предварительная обработка проб воды заключалась в выпаривании 1 л и перенесении сухого остатка на стандартную алюминиевую мишень. Пробы донных отложений высушивались при температуре 105° до постоянного веса и прокаливались при 500°. Из прокаленного остатка готовились препараты весом 300—400 мг.

Радиометрический анализ заключался в определении суммарной β -активности препаратов. Измерения проводились на радиометре «Волна» с помощью торцового счетчика Т-25-БФЛ.

При расчете «абсолютной» активности образцов применялся относительный метод сравнения с калиевыми эталонами с учетом самопоглощения β -излучений с максимальной энергией β -спектра 1.32 Мэв. Результаты измерений выражены в пикокюри (пк). Средняя квадратическая ошибка измерений составляла 8—27% для проб воды и не превышала 12% для проб ила.

Для определения природного радиоактивного фона воды и донных отложений во всех пробах определялось содержание калия. Определения, выполненные Н. А. Кобяковой, произведены методом пламенной фотометрии. Активность 1 мг калия, связанная с присутствием природного радиоактивного изотопа K^{40} , составляет 0.8 пак. Калиевая активность вычислялась для каждого препарата и вычиталась из суммарной активности образца.

В период наблюдений содержание калия в волжской воде колебалось от 1.5 до 3.1 мг/л. В тонкодисперсной фракции ила калий содержался в количестве от 17.3 до 26.0 мг/г прокаленного остатка; в пробах ила, не разделенных на фракции, от 12.0 до 23.0 мг/г прокаленного остатка.

Поправка на активность, обусловленную содержанием урана, не вводилась, так как, согласно литературным данным (Баранов и Цейтлин, 1941; Старик и др., 1958), содержание последнего в поверхностных водах и грунтах составляет величины порядка 10^{-5} и $10^{-4}\%$. При измерении активности сухих остатков 1 л воды и навесок ила 300—400 мг такие количества урана будут обуславливать β -активность за счет UX_2 менее 1 пак — величины, стоящей за пределами чувствительности нашего метода измерений.

СОСТАВ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫПАДЕНИЙ В ПЕРИОД НАБЛЮДЕНИЙ

Для определения состава радиоактивных продуктов, поступление которых в водохранилища возможно в период снеготаяния, были отобраны пробы снега на площади водосбора. Произведены измерения активности образцов и наблюдения над ее снижением во времени. Графическая обработка полученных данных по формуле ¹ Вейя и Вигнера (цит. по Геденову, 1957), выражающей закономерность снижения суммарной радиоактивности смеси осколков деления урана, позволила определить возраст продуктов деления, содержащихся в пробах снега. Понятие возраст продуктов деления означает время, прошедшее от начала деления или даты взрыва. Летом 1965 г. возраст продуктов деления, содержащихся в снеговых пробах, измерялся примерно 3 годами. С помощью номограммы Хантера и Беллоу (цит. по Геденову, 1957) установлен химический состав радиоактивных продуктов в возрасте 3 лет и процент активности от суммарной, обусловленный каждым из присутствующих изотопов (табл. 1).

¹ Уравнение Вейя и Вигнера: $A_t = A_1 t^{-1,2}$, где A_t — активность суммы осколков деления через время t после момента деления; A_1 — активность суммы осколков в начале деления.

Таблица 1

Состав продуктов деления в возрасте 3 лет

Изотоп	Период полураспада	Дочерний изотоп	Период полураспада	% активности материнского и дочернего изотопов от суммарной
Ce ¹⁴⁴	282 дня	Pr ¹⁴⁴	17 мин.	42
Sr ⁹⁰	28 лет	Y ⁹⁰	91 час	18
Pm ¹⁴⁷	2,6 года	—	—	19
Cs ¹³⁷	30 лет	Ba ¹³⁷	2,6 мин.	14
Ru ¹⁰⁶	1 год	Rh ¹⁰⁶	20 сек.	6

Таким образом, в состав радиоактивных выпадений, содержащихся в снеговом покрове зимой 1965 г., входят пять долгоживущих радиоактивных изотопов с периодом полураспада от 282 дней до 30 лет. При распаде этих продуктов деления, за исключением прометия, образуются дочерние радиоактивные изотопы, обладающие малым периодом полураспада и жестким β -излучением (табл. 1, 2). При относительно низком уровне активности образцов и измерении их не ранее чем через месяц после сбора присутствие дочерних изотопов возможно только при наличии материнского в количестве, по активности равновесном с последним.

Таблица 2

Энергия излучения продуктов деления в возрасте 3 лет

Изотоп	Энергия излучения, Мэв		Дочерний изотоп	Энергия излучения, Мэв	
	β	γ		β	γ
Ce ¹⁴⁴	0.31 (76%) 0.19 (20%)	0.13, 0.03	Pr ¹⁴⁴	2.97 (99%)	0.69
Sr ⁹⁰	0.5	—	Y ⁹⁰	2.2	—
Pm ¹⁴⁷	0.22	—	—	—	—
Cs ¹³⁷	0.52 (92%)	0.66	Ba ¹³⁷	—	0.66
Ru ¹⁰⁶	0.04	—	Rh ¹⁰⁶	3.53	0.51, 0.62

При использованной методике измерения из долгоживущих продуктов деления с наибольшей эффективностью регистрируются Ce¹⁴⁴ и Sr⁹⁰.

В воде и донных отложениях водохранилищ процентное соотношение активностей долгоживущих осколков деления отлично от наблюдаемых в снеговых пробах и зависит от интенсивности смыва с площади водосбора. В свою очередь последняя определяется химическими свойствами радиоактивного изотопа.

ПОСТУПЛЕНИЕ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ С ПЛОЩАДИ ВОДОСБОРА

Миграционная способность радиоактивных изотопов в значительной мере зависит от их физико-химического состояния. По степени дисперсности выделяют две группы продуктов деления. К первой, включающей радиоактивные изотопы, находящиеся в ионной или растворимой форме, относятся Sr⁹⁰ и Cs¹³⁷. Ко второй, содержащей продукты деления в коллоидальном состоянии, принадлежат редкие земли (Ce¹⁴⁴, Pm¹⁴⁷) и Ru¹⁰⁶. В условиях взрыва продукты деления, преимущественно второй группы, образуют нерастворимые окислы и при переходе из газообразного состоя-

ния в твердое образуют с железом сплавленные частицы, отличающиеся слабой растворимостью. Стронций и цезий также могут войти в состав этих частиц и стать нерастворимыми (Reissig, 1959). Исследование выпадающих продуктов деления показало, что растворимая фракция Sr^{90} , Cs^{137} и Ce^{144} составляла соответственно 95.6, 70.0 и 42.0% (Wellford a. Collins, 1960).

Выпадая на земную поверхность, радиоактивные продукты поглощаются почвой и растительным покровом. По данным В. М. Ключковского и И. В. Гулякина (1958), почвы обладают высокой сорбционной способностью к большинству продуктов деления. Однако прочность поглощения различна для разных изотопов. Наибольшей подвижностью обладают стронций и рутений. Под действием поверхностных вод часть радиоактивного стронция может быть вытеснена из почвы в результате ионного обмена. Степень вытеснения зависит от обменной емкости почвы, pH почвенного раствора и содержания кальция, химического аналога стронция. Редкие земли и цезий прочно фиксируются почвами и почти не десорбируются под влиянием поверхностных вод (Поляков, 1956; Спицин и Громов, 1959; Титлянова и Тимофеева, 1959).

Наблюдения, произведенные нами в 1959 г. на р. Волге, показали, что в период весеннего половодья поступление продуктов деления в возрасте 6—7 месяцев составляло 4.5% от общего запаса в снеговом покрове площади водосбора реки. За этот период в Волгу поступило 13% Sr^{90} . Относительно высокий процент смыва Sr^{90} с площади водосбора установлен и другими авторами (Straub a. oth., 1960; Morgan a. Stanbury, 1961). Следует отметить, что в апреле 1959 г. средняя величина радиоактивности волжской воды на незарегулированном участке, где максимально выражено влияние поверхностного стока талых вод, была примерно в 20 раз меньше активности снеговой воды. После заполнения волжских водохранилищ в июне соотношение удельной активности снеговой воды с поправкой на распад и вод Иваньковского, Угличского и Рыбинского водохранилищ в среднем равнялось 27 : 1.

В июне и июле 1965 г. в период более полного смешения паводочных вод с малоактивными зимними средний уровень радиоактивности воды верхневолжских водохранилищ оказался всего лишь в 5 раз меньше активности снеговых вод. Таким образом, на основании соотношения радиоактивности снеговой и речных вод в период наблюдений с уверенностью можно заключить, что поступление старых продуктов с площади водосбора значительно выше, чем осколков деления, возраст которых измеряется 6—7 месяцами.

Повышенный сток долгоживущих продуктов деления объясняется отчасти увеличением относительного содержания Sr^{90} — радиоактивного изотопа, обладающего наибольшей миграционной способностью.

При изучении загрязнения радиоактивными выпадениями трех небольших рек Англии установлено, что содержание долгоживущего Sr^{90} и короткоживущего Sr^{89} в речной воде меньше наблюдавшегося в дождевой соответственно в 20 и 60 раз (Morgan a. Stanbury, 1961). Более высокую концентрацию в речной воде Sr^{90} авторы объясняют дополнительным поступлением с площади водосбора в результате десорбции из почв.

ФАКТОРЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ВОДОХРАНИЛИЩЕ

Как известно, в период весеннего половодья в Волгу вносится большое количество взвесей в результате размыва талыми водами почв и грунтов на площади водосбора. Радиоактивные продукты, содержащиеся в паводочных водах в ионной и коллоидальной форме (часть несорбированной

активности), вступают в новую стадию взаимодействия со взвешенными веществами, которая характеризуется другими соотношениями жидкой и твердой фаз. По сравнению с почвенным раствором в условиях водоема резко снижается концентрация взвешенных веществ, повышается относительная сорбционная способность взвеси и увеличиваются коэффициенты распределения радиоизотопов. Однако абсолютные количества извлеченных продуктов деления в результате сорбционных процессов, естественно, зависят от уровня радиоактивности воды.

При изучении сорбции долгоживущих продуктов деления из суспензии глины на речной и дистиллированной воде при концентрации глинистых частиц от 16 до 256 мг/л получены высокие коэффициенты распределения² радиоактивного церия и цезия (8900—3900), средние для рутения (1600—690) и сравнительно низкие для стронция (950—660) (Gardner a. Sculberg, 1964). Эти же авторы отмечают подавление сорбции рутения из глинистой суспензии на речной воде. Несмотря на то что процесс сорбции зависит от целого ряда факторов (природа и обменная емкость взвешенных веществ, химический состав воды, особенно важный для Sr^{90} , микроколичества которого участвуют в ионном обмене вместе с Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^{+} , Na^{+} и др.), в водоемах преимущественно сорбируются взвешенными веществами церий и цезий.

В конце половодья, после заполнения водохранилищ и снижения скоростей течения, непрерывное оседание взвешенных веществ и связанных с ними радиоактивных изотопов происходит наиболее интенсивно.

Наблюдения и расчеты, произведенные в 1959 г., показали, что в волжских водохранилищах в результате осаждения задерживается более 40% радиоактивных продуктов в возрасте 6—7 месяцев, поступивших в Волгу в период весеннего половодья. Процент задержки установлен путем сопоставления фактически наблюдаемого уровня радиоактивности воды в пункте ниже системы водохранилищ с данными по удельной активности воды у этого пункта, вычисленными с учетом снижения активности за счет радиоактивного распада и разбавления.

В 1965 г. после заполнения водохранилищ не наблюдалось снижения уровня радиоактивности воды. Это позволяет предположить, что оседание без участия организмов для долгоживущих осколков урана не является решающим фактором накопления в донных отложениях водоема.

По-видимому, в превращении долгоживущих продуктов деления важная роль принадлежит биохимическим процессам, причем водные организмы выступают не только в качестве накопителей радиоактивных веществ, но и трансформаторов, способствующих переходу продуктов деления из растворенного и коллоидального состояния в нерастворимую форму и их осаждению.

В период наблюдений в 1965 г. статистически достоверное снижение радиоактивности воды в водохранилищах отмечено только в разгар вегетационного периода. Таким образом, в летние месяцы распределение радиоактивных продуктов, содержащихся в воде водохранилища, зависит от их участия в биологических процессах и от интенсивности последних. В связи с этим представляют интерес данные Н. В. и Е. А. Тимофеевых-Ресовских (1959) о поглощении долгоживущих продуктов деления водными организмами. В частности, обращают внимание высокие коэффициенты накопления Ce^{144} пресноводными организмами различных групп, включая бактерий, высшую водную растительность, планктон и бентос. В результате изучения поглощения и выделения радиоактив-

² Коэффициент распределения выражает отношение активности 1 г взвеси к активности 1 мл воды после установления динамического равновесия активности между жидкой и твердой фазами и характеризует подвижность радиоизотопа.

ного церия моллюском *Dreissena polymorpha* Глазер (Glaser, 1962b) установил, что Ce^{144} преимущественно накапливается в раковине моллюска. Наиболее высокие концентрации обнаружены в растущей части раковины, что является показателем активного участия Ce^{144} в ее построении. Наблюдениями над накоплением радиоактивных выпадений высшими водными растениями в оз. Штехлинзее этот же автор (1962a) показал, что их активность почти исключительно обусловлена Ce^{144} . Он же (1966) установил, что при отмирании водных растений радиоактивный церий не поступает в воду и что растительные остатки и детрит дополнительно сорбируют церий из воды. Аналогичные результаты получены Г. Г. Поликарповым (1961) для морской водоросли *Cystoseira barbata*. В то же время Sr^{90} после гибели этой водоросли практически полностью возвращается в морскую воду. Cs^{137} вовлекается в морские отложения частично с невысокими коэффициентами накопления. В экспериментальных водоемах с пресной водой отмечено высокое накопление Cs^{137} в грунте, что объясняется способностью этого элемента проникать в кристаллическую решетку силикатов (Агафонов и др., 1960).

В водохранилищах непосредственный контакт водных масс с грунтами, слагающими дно водоема, также является фактором поглощения долгоживущих продуктов деления из воды. Однако при снижении уровня активности воды не исключено обратное поступление радиоактивных продуктов из донных отложений. По данным Б. А. Степанова (1957), осколочные радиоэлементы, сорбированные илом, очень трудно вымываются водой. В условиях опыта в течение 2 месяцев десорбировалось примерно 4% от активности ила, при этом в раствор переходил в основном радиоактивный стронций.

СОДЕРЖАНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Как уже отмечалось, измерение суммарной β -активности производилось в пробах, содержащих тонкодисперсную фракцию ила с размером частиц менее 0.01 мм, и в исходных пробах жидкого наилка, не подвергавшихся разделению. В табл. 3 приведены результаты измерения активности проб донных отложений, отобранных в июне и июле 1965 г.

Определения активности производились в последней декаде октября, т. е. через 3—4 месяца после взятия проб.

Во всех пунктах наблюдений наиболее высокие значения активности получены для тонкодисперсной фракции ила. Судя по потере при прокаливании, эти пробы отличались и более высоким содержанием органического вещества. Химический состав тонкодисперсной фракции донных отложений характеризуется данными, представленными в табл. 4 (анализ выполнен В. М. Смеловой).

Результаты измерения активности донных отложений Горьковского водохранилища приведены в табл. 5. Активность измерялась через пять месяцев после взятия проб. В Горьковском водохранилище активность проб донных отложений без деления на фракции выражалась величинами, аналогичными суммарной активности проб из других водохранилищ Верхней Волги. Более низкие значения активности проб тонкодисперсной фракции илов в Горьковском водохранилище объясняются тем, что измерения проводились через большой промежуток времени после взятия проб. За этот период произошло снижение активности за счет распада продуктов деления с периодом полураспада около года. Присутствие продуктов деления со средним периодом полураспада было обнаружено в пробах ила путем наблюдения над снижением их активности с течением времени. В некоторых пробах донных отложений ход

Т а б л и ц а 3

Радиоактивность донных отложений верхневолжских водохранилищ, 1965 г.

Место отбора проб	11—12 VI		7—8 VII	
	потеря при прокаливании, % от сухого вещества	β -активность прокаленного остатка, пк/г	потеря при прокаливании, % от сухого вещества	β -активность прокаленного остатка, пк/г

Тонкодисперсная фракция ила

Иваньковское водохранилище выше плотины	16.60	59.2	16.43	84.5
Угличское водохранилище:				
Кимры	18.20	48.4	17.28	79.0
Калязин	17.59	62.8	10.50	66.2
выше плотины	11.51	41.6	11.04	16.6
Рыбинское водохранилище:				
Коприно	14.97	66.4	19.30	62.1

Ил без отстоя

Иваньковское водохранилище выше плотины	11.10	45.9	8.76	31.9
Угличское водохранилище:				
Кимры	7.59	30.2	7.58	31.0
Калязин	14.47	48.7	11.03	51.0
выше плотины	8.77	32.3	10.45	29.1
Рыбунское водохранилище:				
Коприно	14.13	37.1	11.10	34.7

Т а б л и ц а 4

Химический состав тонкодисперсной фракции илов верхневолжских водохранилищ, июнь 1965 г. (% от прокаленного остатка)

Место отбора проб	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	CaO	MgO
Иваньковское водохранилище выше плотины	56.80	20.73	7.52	0.30	0.96	—	—
Угличское водохранилище у Калязина	63.21	15.86	8.07	0.32	0.52	3.08	2.28
Рыбинское водохранилище у Коприна	63.43	13.95	8.02	0.28	0.47	2.97	2.78

снижения активности почти полностью соответствовал скорости распада Ce^{144} : определенный по графику период полураспада присутствующего в образце радиоизотопа составлял 280 дней (рисунок). Однако для большинства проб активность снижалась более медленно, что указывало на присутствие в них долгоживущих продуктов деления.

Продолжительность периода наблюдений над снижением активности не превышала 1 года. За такой промежуток времени активность Sr^{90} и Cs^{137} практически не изменяется. Если допустить, что активность об-

Т а б л и ц а 5

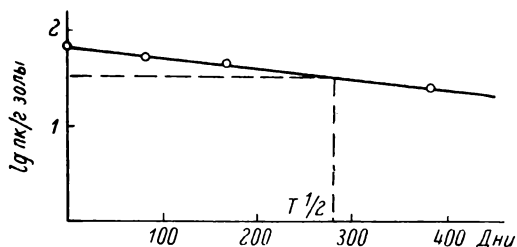
Радиоактивность донных отложений
Горьковского водохранилища (11—23 VIII 1965)

Место отбора проб	Потеря при прокаливании, %, от сухого вещества	β-активность прокаленного остатка, пк/г
Тонкодисперсная фракция ила		
Ниже Ярославля:		
5 км	13.00	34.2
50 км, русло Волги	17.00	64.4 *
50 км, у правого берега	11.70	27.2
Ниже Кинешмы	17.80	40.5
Выше плотины	20.70	46.3
	21.00	55.7
Ил без отстоя		
Ниже Ярославля:		
5 км	12.20	35.6
10 км	9.96	20.3
50 км, русло Волги	9.02	28.9 *
50 км, у правого берега	9.80	37.5
Ниже Кинешмы	11.40	42.8
Выше плотины	11.00	35.5
	12.40	41.5

разцов ила обусловлена бинарной смесью β-излучателей, в состав которой входит долгоживущий изотоп, активность которого не изменяется на данном отрезке времени, и радиоизотоп со средним периодом полураспада ($T=282$ дня), то содержание долгоживущей компоненты можно определить из уравнения

$$a_1 - x = k(a_t - x),$$

где a_1 — исходная активность образца; a_t — активность образца через время t ; k — поправка на распад для Ce^{144} за время t ($k = e^{0.693 \frac{t}{T}}$); x — активность, обусловленная долгоживущим изотопом.



Снижение активности образца ила. Угличское водохранилище ниже Калязина 7 VII 1965.

Путем расчетов были произведены определения содержания долгоживущих продуктов деления с большим и средним периодом полураспада в пробах ила и воды (табл. 6, 7).

Приведенные данные показывают, что Ce^{144} в большем количестве концентрируется в верхнем тонкодисперсном слое донных отложений. Содержание продуктов деления с большим периодом полураспада было более высоким в пробах ила, не подвергавшихся разделению. Это позволяет предположить, что стронций сорбируется как тонкой фракцией ила, так и более крупными частицами и проникает в нижележащие слои иловых отложений.

* Измерение активности производилось через три месяца после отбора проб.

Т а б л и ц а 6

Содержание долгоживущих продуктов деления в донных отложениях
водохранилищ в 1965 г.

Место отбора проб	Дата	Sr ⁹⁰ прокален- ного остатка, пк/г	Ce ¹⁴⁴ прокален- ного остатка, пк/г
Тонкодисперсная фракция ила			
Угличское водохранилище у Каля- зина	7 VII	5.1	61.1
Рыбинское водохранилище у Коприна	12 VI	10.1	56.3
Ил без отстоя			
Угличское водохранилище у Каля- зина	7 VII	19.4	31.6
Рыбинское водохранилище у Коприна	12 VI	26.4	10.7

Т а б л и ц а 7

Содержание долгоживущих продуктов деления в донных
отложениях Горьковского водохранилища (август 1965 г.)

Место отбора проб	Sr ⁹⁰ прокаленного остатка, пак/г	Ce ¹⁴⁴ прокаленного остатка, пк/г
Тонкодисперсная фракция ила		
Ниже Ярославля:		
5 км	8.4	25.8
50 км, русло Волги	1.5	62.9
Ниже Кинешмы	1.6	38.9
Выше плотины	37.0	18.7
Ил без отстоя		
Ниже Ярославля:		
5 км	15.7	19.9
50 км, русло Волги	2.6	34.9
Ниже Кинешмы	17.0	25.7
Выше плотины	31.0	10.6

В верхних и средних частях водохранилищ донные отложения содержат больше Ce¹⁴⁴, чем стронция, в то время как в предплотинных участках активность ила в основном обусловлена присутствием долгоживущих продуктов деления. По-видимому, церий вместе с влекомыми наносами не достигает в большом количестве предплотинной части Горьковского водохранилища вследствие поглощения водными организмами и прочной сорбции этого радиоизотопа продуктами их распада.

Результаты сопоставления содержания продуктов деления в воде и донных отложениях представлены в табл. 8.

Высокие коэффициенты накопления продуктов деления прежде всего объясняются тем, что анализировался самый верхний тонкодисперсный слой иловых отложений. Влияние степени дисперсности и характера грунта на сорбцию долгоживущих продуктов деления хорошо продемонстрировано в работе И. О. Богатырева (1962). По данным этого автора, коэффициенты накопления Sr⁹⁰ песком и илом в среднем составляли 1 и 240, для Cs¹³⁷ 20 и 5300 соответственно. На основании литературных данных следовало ожидать более низкие коэффициенты накопле-

Таблица 8

Коэффициенты накопления долгоживущих продуктов деления донными отложениями водохранилищ

Место отбора проб	Характер отложений	$K_{Sr^{90}}$	$K_{Cs^{144}}$
Угличские водохранилище у Казязина	Тонкодисперсная фракция	2100	7100
Угличское водохранилище у Кимр	Ил без отстоя	1100	3400
Горьковское водохранилище у Кинешмы	Тонкодисперсная фракция	1100	4100

Примечание. Коэффициент накопления (K) — отношение активности 1 г ила (сухой вес) к активности 1 мл воды.

ния для Sr^{90} . Полученные величины, по-видимому, обусловлены присутствием в пробах ила и Cs^{137} , активно поглощаемого грунтами, хотя при использованном методе измерения активности в основном учитывался стронций. Полученные значения коэффициентов накопления для Ce^{144} вполне согласуются с данными о высокой сорбции этого радиоизотопа взвешенными веществами органического и минерального происхождения.

Заключение

Целью настоящей работы являлось изучение распределения радиоактивных выпадений в водохранилище, которые поступают в основном с водами поверхностного стока в период весеннего половодья. Для определения состава радиоактивных выпадений в источнике питания водохранилищ — снеговых водах — производился отбор проб снега, измерение их суммарной активности и наблюдение над ее снижением с течением времени. В результате установлено, что в период наблюдений активность выпадений обусловлена в основном четырьмя долгоживущими продуктами деления: Ce^{144} , Sr^{90} , Cs^{137} и Ru^{106} . Сопоставление удельных активностей снеговых вод и воды из водохранилищ позволяет заключить, что поверхностный сток старых продуктов деления (в возрасте 3 лет) значительно выше, чем осколков деления, возраст которых измеряется 6—7 месяцами. После весеннего заполнения водохранилищ и снижения скоростей течения практически не отмечено снижения удельной β -активности воды. Это свидетельствует о том, что оседание взвешенных веществ не является важным фактором перехода долгоживущих продуктов деления из воды в донные отложения в отличие от осколков деления в возрасте 6—7 месяцев.

При анализе донных отложений наибольшие значения β -активности получены для тонкодисперсной фракции ила. Наблюдения над спадом активности проб с течением времени показали, что в некоторых пробах снижение активности соответствовало скорости распада Ce^{144} . Ход распада в большинстве проб был более медленным, что указывало на присутствие в них долгоживущей компоненты. Содержание в образцах ила бинарной смеси β -излучателей, в которую входит долгоживущий изотоп, активность которого практически не изменяется на данном отрезке времени, и радиоизотоп со средним периодом полураспада, позволило использовать расчетный метод определения состава изотопов.

В результате определений Sr^{90} и Cs^{137} обнаружены в относительно малых количествах в тонкодисперсной фракции илов, в то время как содержание церия в них было значительным. В пробах ила, не подвер-

гавшихся разделению, большая доля активности обусловлена долгоживущими изотопами. В донных отложениях верховьев, и особенно средних частей, водохранилищ церий преобладает над стронцием и цезием; в предплотинных участках содержание церия снижается и в Горьковском водохранилище выше плотины увеличивается количество долгоживущих продуктов деления. Таким образом, церий почти не достигает предплотинной части Горьковского водохранилища в составе влекомых наносов вследствие интенсивной сорбции и поглощения водными организмами.

Изложенное толкование полученных результатов является предварительным и требует более обширного материала для подтверждения.

ЛИТЕРАТУРА

- Агафонов Б. М., Т. И. Долгих, М. И. Савченко и Н. В. Тимофеев-Ресовский. 1960. Опыт по распределению стронция, рутения, цезия, церия и неразделенного раствора осколков урана в сериях бачков. Тр. Инст. биол. УФАИ СССР. Сб. работ лабор. биофиз., вып. 12.
- Баранов В. И. и С. Г. Цейтлин. 1941. Содержание радиоактивных элементов в некоторых почвах СССР. ДАН СССР, т. XXX, № 4.
- Богатырев И. О. 1962. Распределение Co^{60} и некоторых радиоизотопов — продуктов деления по компонентам экспериментальных водоемов. Изв. АН СССР, сер. биол., № 1.
- Геденов Л. И. 1957. Радиоактивное загрязнение атмосферы. Атомная энергия, т. 2, № 3.
- Клечковский В. М. и И. В. Гулякин. 1958. Поведение в почвах и растениях микроколичеств стронция, цезия, рутения и циркония. Почвоведение, № 3.
- Поликарпов Г. Г. 1961. Роль детритообразования в миграции стронция-90, цезия-137 и церия-144. ДАН СССР, т. 136, № 4.
- Поляков Ю. А. 1956. Проблема «заражения» почв и сельскохозяйственных посевов продуктами радиоактивного распада. Почвоведение, № 8.
- Спицын В. И. и В. В. Громов. 1959. Поглощение радиостронция некоторыми минералами почв и грунтов. Почвоведение, № 12.
- Старик И. Е., Д. С. Николаев, Ф. Е. Старик и О. С. Меликова. 1958. Содержание урана в природных водах СССР, Тр. Радиового инст. им. В. Г. Хлопина АН СССР, т. VIII.
- Степанов Б. А. 1957. Десорбция некоторых осколочных радиоэлементов из донных отложений. Гигиена и санитария, № 11.
- Тимофеев-Ресовский Н. В. и Е. А. Тимофеева-Ресовская. 1959. Распределение излучателей в водоеме. Совещ. по вопр. экспл. Камского водохр., Пермь.
- Титлянова А. А. и Н. А. Тимофеева. 1959. О подвижности соединений кобальта, стронция и цезия в почве. Почвоведение, № 3.
- Gardner K. a. O. Skulberg. 1964. Sorption phenomena of radionuclides to clay particles in river water. Air and water pollut., v. 8, № 3—4.
- Glaser R. 1962a. Über die Radioaktivität einiger submerser Wasserpflanzen. Limnologica, B. 1, H. 1.
- Glaser R. 1962b. Inkorporation und Dekorporation von Radiocer (Ce^{144}) durch die Muschel *Dreissensia polymorpha*. Zoologische Jahrbücher Physiol., Bd. 70, H. 1.
- Glaser R. 1966. Postmortale Veränderungen der Radioaktivität submerser Wasserpflanzen. Limnologica, Bd. 4, H. 1.
- Morgan A. a. D. Stanbury. 1961. The contamination of rivers with fission products from fallout. Health Physics, v. 5, № 3—4.
- Reissig H. 1959. Das Problem der radioaktiven Verseuchung des Bodens und der Vegetation durch Kernspaltprodukte. Kernenergie, Bd. 6, H. 2.
- Straub C. P., L. R. Setter, A. Goldin a. P. Hallbach. 1960. Strontium-90 in surface water in the United States. Journ. Amer. water works assn., v. 52, № 6.
- Wellford G. A. a. W. R. Collins. 1960. Fallout in New York City during 1958. Science, v. 131, № 3415.

К ПРИМЕНЕНИЮ ХЕМИЛЮМИНЕСЦЕНТНОЙ РЕАКЦИИ ОКИСЛЕНИЯ ЛЮМИНОЛА ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАЧЕСТВА ВОДЫ В ВОДОЕМЕ

Разрушение соединений, поступающих в водоем с промышленными и бытовыми стоками, в значительной мере связано с их окислением. Подавляющее большинство процессов окисления органических веществ в жидкой фазе идет по типу цепных химических реакций (Эмануэль, 1966). Особая роль в окислительном процессе принадлежит свободным радикалам как активной форме вещества. Каталитический распад органических веществ, если он идет в присутствии кислорода в среде, способной к окислению, вызывает свободнорадикальный окислительный процесс. При этом скорость рекомбинации свободных радикалов равна скорости их образования. С точки зрения цепной теории в настоящее время трактуются процессы ферментативного гидролиза и распад многих сложных биологически активных веществ.

Изучение цепных окислительных реакций веществ, взаимодействующих в воде, вероятно, позволит судить о некоторых механизмах процесса разрушения и новообразования органического вещества.

Цепные окислительные реакции при загрязнении и самоочищении водоема до сих пор не изучались. Такая возможность возникла в связи с появлением хемилюминесцентных методов исследования медленных химических процессов, разработанных коллективом авторов в Институте химической физики АН СССР (Шляпинтох и др., 1966).

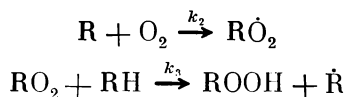
В основу метода положено использование реакций, при которых энергия, освобождающаяся в результате химического окисления вещества, проявляется в виде светового излучения — хемилюминесценции. Интенсивность излучения в хемилюминесцентных реакциях отражает напряженность окислительного процесса (Шляпинтох, Карпухин и Захаров, 1966).

В настоящем сообщении представлены результаты использования хемилюминесцентной реакции люминола для оценки влияния ингибирующих соединений на цепной окислительный процесс в водах, загрязненных промышленными и бытовыми стоками.

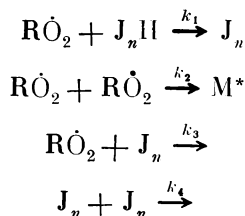
В качестве окисляющегося вещества был взят гидразид 3-аминофталевой кислоты (люминол). Окисление люминола происходит в щелочной среде с помощью перекиси водорода и с участием катализаторов. При введении в раствор веществ, тормозящих или обрывающих окислительный процесс, яркость хемилюминесценции снижается или свечение совершенно исчезает.

Действие ингибиторов основано на том, что, взаимодействуя с перекисными радикалами, они уменьшают их концентрацию и тем самым

снижают скорость реакции продолжения цепи. Обычно ход цепной реакции окисления представляют следующим образом:



Инициатором цепной реакции служит вещество, распадающееся на радикалы, в данном случае перекись водорода. При этом происходит образование радикалов $\dot{\text{R}}$ и $\text{R}\dot{\text{O}}_2$. Окисляемое вещество RH , в данном случае люминол, взаимодействуя с перекисным радикалом RO_2 , образует гидроперекись ROOH и радикал $\dot{\text{R}}$; k_2 и k_3 — константы продолжения реакции. Механизм действия ингибитора в хемилюминесцентной реакции окисления изложен в работе В. Я. Шляпникова, О. Н. Карпухина, Л. М. Постникова, И. В. Захарова, А. А. Вичутинского и В. Ф. Цепалова (1966). При введении ингибитора J_nH малоактивные радикалы J_n , образующиеся из ингибитора при их рекомбинации между собой и с перекисными радикалами RO_2 , не приводят к образованию возбужденных частиц с запасом энергии, достаточным для возбуждения света в видимой части спектра. Таким образом, введение ингибитора в окисляющуюся среду должно приводить к ослаблению люминесценции в той мере, в какой ингибитор уменьшает концентрацию перекисных радикалов. Ход цепной реакции окисления с участием ингибиторов представляют следующим образом:



Оценка ингибирующего действия загрязнений, вносимых в водоем промышленными и бытовыми стоками, производилась по следующей методике: 15 мл исследуемой воды наливали в пробирку объемом 25 мл и в нее прибавляли следующие реактивы: 1 мл 5%-го раствора красной кровяной соли, 1.0 мл 0.1%-го раствора гидразида 3-аминофталевой кислоты, 0.6 мл 0.1%-го раствора H_2O_2 . Содержимое подщелачивали 1—2 каплями разбавленной щелочи до pH 8.5. Реактивы встряхиванием пробирки смешивались с исследуемой водой, включался секундомер и после этого для измерения яркости хемилюминесценции пробирка вставлялась в гнездо флуорометра. Яркость люминесценции регистрировалась на установке, состоящей из фотосопротивления, использованного в качестве приемника излучения, усилителя и микроамперметра. Изменение яркости люминесценции регистрировалось в течение 10 мин. В течение первой минуты снижение яркости хемилюминесценции отмечалось каждые 15 сек., а в последующее время через каждую минуту. Изменение интенсивности свечения воды за указанный промежуток времени сопоставляли с кинетикой свечения в бидистиллированной воде, служащей контролем. Каждый образец воды исследовали 4 раза. Объектами исследования служили образцы вод, отобранные в октябре 1966 г. на участке Волги от Борка до Конакова и на протяжении Москвы-реки, начиная от столицы до впадения в Оку. Кроме того, был исследован участок Оки от места впадения в нее Москвы-реки до Кузьминского шлюза. Пробы отбирали с глубины 0.6 м, а на некоторых станциях были взяты и образцы иловой воды. Вода исследовалась в лаборатории через 4 недели после отбора проб.

При производившемся в полной темноте визуальном наблюдении люминесценция в образцах вод, отобранных на незагрязненных участках водоемов, проявлялась в виде вспышки голубого свечения, возникавшего после прибавления всех необходимых реактивов.

На рис. 1 представлена кинетика хемилюминесцентной реакции в пробах с дистиллированной, бидистиллированной водой и в образце воды, отобранном из Рыбинского водохранилища 14 V 1966 у Коприна.

Начальная (за первые 10 сек.) интенсивность хемилюминесценции в пробах с дистиллированной и бидистиллированной водой оказалась почти однозначной. Но в течение первой минуты яркость в пробе с дистил-

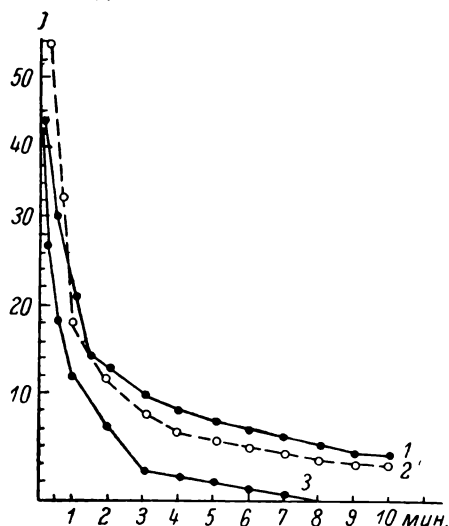


Рис. 1. Кинетика хемилюминесцентной реакции окисления люминола в образцах вод различного происхождения.

1 — в бидистиллированной воде; 2 — в воде Рыбинского водохранилища у Коприна; 3 — в дистиллированной воде.

лированной водой по сравнению с бидистиллированной уменьшилась почти вдвое. Последующие измерения показали, что окисление гидразид 3-аминофталевой кислоты в бидистиллированной воде идет на более высоком уровне. Более низкая интенсивность хемилюминесценции в пробе с дистиллированной водой, вероятно, вызывается присутствием примесей, обладающих ингибирующим действием. Следы органических веществ, присутствующих в дистиллированной воде, были обнаружены и измерены по яркости их свечения, возбуждаемого ультрафиолетовым излучением с длиной волны ~ 366 мкм.

Начальная яркость хемилюминесценции в образце воды, отобранном в мае у Коприна, а также в других образцах чистых вод, оказалась несколько выше, чем в бидистиллированной воде. Это свидетельствует о более интенсивном процессе окис-

ления, которое связано с присутствием в воде инициаторов окислительной реакции. В природной воде могут присутствовать многочисленные органические вещества: липиды, жирные кислоты, углеводы, превращение которых идет с образованием свободных радикалов.

Исследования последних лет (Тарусов и Журавлев, 1965) показали, что реакции с излучением света сопровождают различные проявления жизнедеятельности организмов. Они распространены и среди водных организмов, способных к биолюминесценции (Гительзон и др., 1965). Хемилюминесценция — одно из проявлений биологических процессов в водоемах. В. Д. Федоров (1966) объясняет распространение фотосинтезирующих бактерий в местах, куда не проникает солнечная радиация, наличием слабой хемилюминесценции, которая имеет место при окислительно-восстановительных реакциях.

Михаэлис (цит. по Чансу, 1963) показал, что окислительно-восстановительный процесс имеет многоступенчатый характер и сопровождается образованием радикалов. В то же время в природных водах могут присутствовать и ингибиторы как продукты жизнедеятельности водных организмов. Произведенные нами наблюдения показали, что степень ингибирования цепной окислительной реакции люминола весьма варьирует в зависимости от состава воды в водоеме и степени его загрязнения промышленными и бытовыми стоками (см. таблицу).

Характеристика кинетики хемилюминесценции вод на чистых и загрязненных участках некоторых водоемов. Данные 1966 г.

Дата	Место отбора проб	Глубина, м	Яркость, отн. ед.		Регистрируемая длительность люминесценции, мин.	Конечная зарегистрированная яркость	
			в первые 5 сек.	в первую минуту			
Волга							
Сентябрь							
23	Коприно	5	37	15	> 10	1.0	
23	2 км ниже Калязина	6	42.5	16	> 10	1.0	
24	2 км, ниже Кимр	3	42.5	15.5	> 10	0.5	
25	5 км выше Иванькова	6	43.0	13.5	8	0.5	
25	2 км ниже Конакова	5	40.0	11.5	8	0.5	
Москва-река							
Октябрь							
1	Перервинский шлюз	{	2	29.0	14.0	7	0.5
7			2.5	33.0	12.0	7	0.5
2	Софьино	{	1.2	30.0	9.0	6.5	0.25
7			1.5	35.0	10.0	7.0	0.5
7			Иловая вода	20.0	2.0	1.5	0.2
2	Фаустово	{	1.5	32.0	9.0	6.5	0.5
6			1.5	39.0	11.0	8.0	0.5
6	Плотина	{	Иловая вода	20.0	2.0	2.0	1.0
3	Северская	{	1.5	41.0	15.0	8.0	0.5
6			1.5	45.0	12.0	7.0	0.5
6	Северская	{	Иловая вода	20.0	2.0	1.0	1.0
Ока							
Октябрь							
3	Щурово	{	2.0	53.0	21.0	> 10.0	2.5
5			2.3	49.0	19.0	> 10.0	2.5
4	Белоомут	{	1.0	50.0	19.0	> 10.0	1.5
5			1.5	50.0	20.0	> 10.0	1.5
4	Кузьминская	{	2.0	51.0	20.0	> 10.0	1.2
5			2.0	50.0	19.5	> 10.0	1.0

На рис. 2 представлена кинетика хемилюминесцентной реакции окисления люминола в образцах сточных вод Люберецкой станции аэрации (среднесуточные пробы). Отбор проб был произведен 7—8 и 10—11 X 1966. Пробы отобраны после прохождения полной очистки на станции аэрации перед сбросом в р. Москву.

В обоих образцах отмечено резко выраженное ингибирование окислительной реакции люминола. Яркость люминесценции через 1 мин. после введения реактивов оказалась в 50 раз ниже интенсивности свечения бидистиллированной воды. Это свидетельствует о присутствии в очищенных сточных водах Люберецкой станции аэрации специфической группы органических соединений промышленного синтеза, подавляющих реакции образования радикалов.

Известен большой ряд соединений, называемых антиоксидантами, которые способны тормозить реакцию окисления: фенолы, анилин, ди-

фениламин, α -нафтол, β -нафтол, *o*-крезол, *m*-нитрофенол, *n*-нитроанилин и т. д.

Ряд ингибиторов подавляет обменные процессы в водных организмах и связанную с ними способность люминесцировать. Деятельность флавиновых ферментов и вызываемую ими люминесценцию бактерий подавляют аминазин и хинин. Цианистый калий подавляет действие цитохрома.

Вероятно, ингибиторы, поступающие в водоем со сточными водами, не только тормозят химическую реакцию окисления, но и воздействуют на обменные процессы в организмах. Этот вопрос еще нуждается в изучении.

Как видно из таблицы, кинетика окислительной реакции люминола, наблюдавшаяся в водах различной степени загрязненности, изменялась

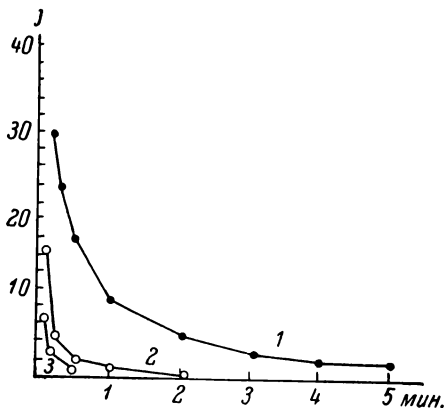


Рис. 2. Кинетика хемилюминесцентной реакции окисления люминола в воде Истринского водохранилища (1), в р. Москве на загрязненном участке у Фаустова (иловая вода) (2) и в сточной воде Люберецкой станции аэрации (3).

довольно значительно, что выразилось в явлении тушения люминесценции. Эффективность тушения характеризовалась не только снижением яркости, но и уменьшением длительности свечения. Визуально люминесценция чистых вод (Рыбинское водохранилище) наблюдалась в течение 17—25 мин. Длительность свечения, регистрируемая с помощью флуорометра, составляла 12—15 мин. В водах, сильно загрязненных производственными стоками, длительность хемилюминесценции сокращалась до 0.25—1.0 мин.

Более сильное торможение окисления люминола по сравнению с участком Волги Кимры—Коприно отмечено в водах у г. Конакова. Яркость хемилюминесценции в первую минуту в воде у Конакова на 23.4% ниже, чем у Коприна. Значительно меньше (8 мин.) оказалось общее время регистрируемой длительности хемилюминесцентной реакции.

Возможно, в данном случае сказывается повышенная загрязненность этого участка реки за счет сточных вод г. Калинина. В стоках этого города большой удельный вес составляют воды химического предприятия. В них присутствуют сложные амины, фенолы, производные анилина и другие тушители хемилюминесценции.

Еще более значительное торможение окисления люминола отмечено на самом загрязненном участке р. Москвы ниже города. В образцах воды, отобранных у Перервинского шлюза, где суммируются все загрязнения, поступающие в р. Москву из предприятий города, первоначальная яркость хемилюминесценции оказалась на 40.6% ниже, чем в бидистиллированной воде, и на 37.1% ниже, чем в воде Истринского водохранилища. Регистрируемая же длительность люминесценции была почти в 2 раза короче, чем в бидистиллированной воде.

Максимальное торможение реакции окисления люминола отмечено у Софьино ниже сбросов в р. Москву сточных вод станций аэрации. Кинетика хемилюминесценции в воде у Софьино оказалась несколько необычной: первоначальное снижение яркости люминесценции по сравнению с бидистиллированной водой составляет 38.9%, т. е. процесс окисления люминола идет на несколько более высоком уровне, чем в пункте реки у Перервы, но в последующее время регистрируемая яркость лю-

минесценции снижается быстрее. Примерно на таком же уровне скорость окисления люминола удерживается и у Фаустова, куда вода р. Москвы из города в зависимости от расходов приходит через 3—5 суток.

При наблюдении изменения кинетики люминесценции в последующих пунктах, расположенных ниже по течению, было отмечено, что начальная яркость ее возрастает, а время свечения удлиняется. Однако на всем загрязненном участке р. Москвы вплоть до впадения ее в Оку значения интенсивности и длительности свечения вод нигде не достигают величин, характерных для чистых участков реки. Это объясняется большой стойкостью некоторых соединений промышленного синтеза — антиоксидантов. Результаты измерения показывают, что их влияние прослеживается на всем протяжении реки от города до устья.

Очень резко тормозится окисление люминола в иловой воде. Яркость ее люминесценции в первую минуту была в 5 раз слабее, чем воды, отобранной на том же участке реки с глубины 0.6 м (см. таблицу). Свечение люминола полностью исчезало через 1—2 мин. после прибавления к иловой воде реактивов. Аэрирование исследуемых образцов не повышало яркости свечения. Все это позволяет предполагать наличие в придонном слое воды значительного количества антиоксидантов.

Высокая напряженность окислительного процесса отмечена на р. Оке у Щурова, расположенного выше впадения Москвы-реки. На таком же уровне яркость свечения сохраняется в воде у Белоомута и у Кузьминского шлюза. Первый пункт расположен на расстоянии 50 км, а второй 96 км ниже впадения Москвы-реки в Оку. Необходимо отметить, что на всем протяжении этого участка реки, несмотря на позднюю осеннюю пору, наблюдалось цветение водорослей.

Влияние антиоксидантов на яркость и длительность хемилюминесценции в воде р. Оки у этих пунктов по измерениям, произведенным с помощью описанной аппаратуры, не обнаружено. Помимо исследований по описанной выше методике, были проведены наблюдения хемилюминесценции, возникающей при прибавлении к исследуемой воде катализатора и люминола в отсутствие перекиси водорода. При этом в образцах вод р. Оки возникала слабая хемилюминесценция, которая наблюдалась визуально. Длительность свечения не превышала 2—3 мин. Появление хемилюминесценции в этих условиях может свидетельствовать о присутствии соединений типа органических перекисей. Окислительные процессы с использованием растворенного кислорода для образования гидроперекисей известны. В этом отношении, например, интересно сопоставить механизм окисления углеводов с помощью перекисных радикалов (Васильев и Вичутинский, 1962) и механизм разрушения углеводов, в котором по одной из теорий также участвуют гидроперекиси (Маврина, 1966). В обоих случаях необходим свободный кислород, который используется при рекомбинации радикалов.

Выводы

С помощью реакции окисления люминола в водоемах, загрязненных промышленными и бытовыми сточными водами, обнаружены соединения, ингибирующие цепной окислительный процесс. На примере р. Москвы показано, что ингибиторы, поступающие в водоем со сточными водами, длительно в нем сохраняются и могут прослеживаться на значительном по расстоянию участке реки. Высоким ингибирующим действием обладают сточные воды не только неочищенные, но и прошедшие очистку на станциях аэрации.

ЛИТЕРАТУРА

- Васильев Р. Ф. и А. А. Вичутинский. 1962. О природе связи хемилюминесценции и окисления молекулярным кислородом. ДАН СССР, т. 142, № 3.
- Гительзон И. И., О. Г. Бакланов, В. С. Филимонов, А. С. Артемкин и Ф. В. Шатохин. 1965. Биолуминесценция как гидрооптический и биологический фактор в море. В сб.: Биолуминесценция, изд. «Наука», М.
- Маврина Л. А. 1966. Окисление углеводов микроорганизмами. В сб.: Биология автотрофных организмов, изд. «Наука», М.
- Тарусов Б. Н. и А. И. Журавлев, 1965. Биохемилюминесценция липидов. В сб.: Биолуминесценция, изд. «Наука», М.
- Федоров В. Д. 1966. Физиологические основы бактериального фотосинтеза. В сб.: Биология автотрофных микроорганизмов, Изд. МГУ, М.
- Чанс В. 1963. Свободные радикалы и фермент-субстративные комплексы. В сб.: Свободные радикалы в биологических системах, ИЛ, М.
- Шляпнтох В. Я., О. Н. Карпухин, Л. М. Постников, И. В. Захаров, А. А. Вичутинский и В. Ф. Цепалов. 1966. Хемилюминесцентные методы исследования медленных химических процессов. Изд. «Наука», М.
- Шляпнтох В. Я., О. Н. Карпухин и И. В. Захаров. 1966. Хемилюминесцентные методы изучения радикальных реакций. В сб.: Свободно-радикальные процессы в биологических системах, изд. «Наука», М.
- Эмануэль Н. М. 1966. Свободно-радикальные элементарные процессы в цепных реакциях жидкофазного окисления. Журн. Всес. хим. общ. им. Менделеева, т. XI. вып. 2.
-

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИФфуЗИОННО-ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ АММИАКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО АЗОТА В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

Изотермическая дистилляция аммиака, основанная на принципе естественной диффузии газов, впервые была предложена Е. Конвеем и А. Бирном (Conway а. Byrne, 1933) для определения азота в крови. После минерализации образца по Кьельдалю операция перегонки аммиака с водяным паром в аппарате Кьельдаля заменялась изотермической дистилляцией в чашках, предложенных указанными авторами. В дальнейшем простой и удобный метод Конвея нашел применение в биохимической практике, в почвоведении, при анализах донных отложений и при определении аммонийного азота в природных водах.

Мы использовали этот метод, несколько усовершенствовав его, для определения малых количеств органического азота, содержащегося в природных водах.

В своей работе мы пользовались стеклянными чашками Конвея, парафиновыми чашками, изготавливаемыми непосредственно в лаборатории по К. Б. Халилову (1960) и предложенными Г. Г. Горбатеньким (1964) для определения аммонийного азота в воде, чашками из органического стекла, изготовленными в экспериментальной мастерской института. Последние оказались наиболее удобными, так как имели во внешней камере перегородку, изолировавшую пробу от щелочи до полной герметизации чашки, чего не было в стеклянных чашках, и в отличие от парафиновых могли служить долгое время.

В качестве крышек к чашкам Конвея использовали чашки Петри подходящего диаметра, в которые тонким слоем наливали разогретую смесь вазелина с парафином и охлаждали на горизонтальной поверхности. Смесь готовили в соотношении примерно 3 : 1. Для восстановления целостности слоя смазки крышки после каждого использования нагревали в термостате до расплавления смеси и охлаждали на горизонтальной поверхности.

Для определения органического азота проба воды объемом в 50—100 мл помещалась в колбу Кьельдаля. К пробе добавлялся 1 мл химически чистой концентрированной H_2SO_4 с 2%-м содержанием селена. Содержимое колбы упаривалось на плитке или песчаной бане до полного удаления воды, затем колба закрывалась пробкой-холодильником. Минерализация производилась до обесцвечивания содержимого колбы. Чтобы учесть поправки на реактивы, каждую серию проб сопровождали 2—3 контрольными пробами. После окончания минерализации проба охлаждалась, холодильник и горло колбы споласкивали небольшим количеством безаммиачной воды и содержимое кьельдалевской колбы переносили в мерную колбу на 50 мл и доводили до метки безаммиачной водой.

Чашку Конвея ставили несколько наклонно. Из мерной колбы брали 10—15 мл пробы и помещали во внешнюю камеру чашки по одну сторону перегородки. По другую сторону перегородки помещали 5—7 мл 40%-го раствора NaOH. Во внутреннюю камеру в качестве поглотителя диффундирующего аммиака вносили 1 мл 0.05 М раствора KH_2PO_4 , обладающего, согласно данным Хауса и Скавинского (цит. по Краснову, 1959), лучшей поглотительной способностью, чем борная кислота, обычно применяющаяся с этой целью. Поскольку поглощенный аммиак определяется затем прямым титрованием или колориметрически, необходимость в очень точном измерении объема приливаемого раствора и, следовательно, в калибровании пипеток, используемых для его приливания, отпадает. Чашка плотно закрывалась крышкой, ставилась на горизонтальную поверхность, и содержимое внешней камеры перемешивалось осторожными круговыми движениями. По данным Н. Б. Мякиной (1958), при температуре 37° диффузия аммиака заканчивается за 2—3 часа. Для полной диффузии при комнатной температуре, по данным И. С. Ройзмана (1961), необходимо около 15 час.

Мы оставляли чашки при температуре 19—20° до следующего дня. При более низкой температуре скорость диффузии значительно снижается. На следующий день крышку с чашки снимали и поглощенный аммиак определяли прямым титрованием или колориметрически.

Титрование производили непосредственно в чашке Конвея. Во внутреннюю камеру вносили 1 каплю индикатора — бром-крезолового зеленого (0.1% раствор в 20%-м этиловом спирте). Титрование производилось со свидетелем, 0.01 н. раствором HCl из градуированной пипетки на 1 мл (цена деления 0.01 мл) с тонко оттянутым кончиком. Всасывание и подача раствора осуществлялись с помощью пневматического регулятора (резиновая груша с укрепленным винтовым зажимом). Пневматический регулятор и тонко оттянутый кончик пипетки позволяют вводить раствор очень малыми дозами: по 0.002—0.003 мл.

В качестве свидетеля использовался 1 мл 0.05 М раствора KH_2PO_4 с 1 каплей бром-крезолового зеленого, помещенный во внутреннюю камеру чашки Конвея перед началом определений. По количеству кислоты, пошедшей на титрование, за вычетом поправки на реактивы, определенной в контрольной пробе, рассчитывалось содержание азота.

При колориметрическом определении в качестве поглотителя может быть использован как 0.05 М раствор KH_2PO_4 , так и 0.01 н. раствор H_2SO_4 . После окончания диффузии содержимое внутренней камеры чашки с помощью пипетки с резиновой грушей несколькими порциями безаммиачной воды переносилось в мерную с притертой пробкой пробирку или цилиндр и доводилось до 10 мл. Затем добавлялось 0.5 мл реактива Несслера, имеющегося в продаже или приготовленного по П. П. Коростелеву (1962), и через 30 мин. на ФЭКе с синим светофильтром в кювете длиной в 20 мм определялась оптическая плотность окрашенного раствора. По калибровочной кривой, построенной по стандартным растворам NH_4Cl , определялось содержание азота. При анализе проб с низким содержанием азота мы обычно используем колориметрический вариант этого метода.

Полученная в результате титрования или колориметрического определения величина соответствует суммарному содержанию органического и аммонийного азота (см. таблицу).

Результаты анализа проб стандартного раствора NH_4Cl , приведенные в таблице, свидетельствуют о высокой чувствительности и вполне удовлетворительной точности определения азота описанным методом, что позволяет использовать его для определения общего органического азота в небольших по объему пробах воды. Несложность применяемого оборудования, малая потребность в реактивах и простота выполнения

Результаты определения азота диффузионным методом
(среднее из 3 определений)

Содержание азота в пробе, мкг	Определено			
	титрованием		колориметрически	
	содержание, мкг	ошибка, %	содержание, мкг	ошибка, %
1.00	0.90	—10.0	1.06	+6.0
3.00	3.05	+ 1.7	3.12	+4.0
5.00	4.96	— 0.8	5.10	+2.0
10.00	10.23	+ 2.3	10.13	+1.3
20.00	20.03	+ 0.15	19.50	—2.5
50.00	49.07	— 1.9	—	—

определений также являются немаловажными преимуществами метода диффузионно-изотермической дистиляции.

При сравнении определений содержащегося в воде органического азота, выполненного двумя методами — изотермической дистиляцией и принятым в лаборатории методом прямой нesslerизации, оказалось, что расхождение полученных результатов составляет около 4%.

Помимо определения органического азота, диффузионно-изотермический метод в описанном варианте был использован нами для определения в природных водах амидного азота, отщепляющегося в виде аммиака при определенных условиях кипячения с кислотой, и аммонийного азота.

Отгонка в аппарате Кьельдаля, используемая Ю. Г. Майстренко (1964) в предложенном им методе определения α -аминокислот в природных водах, также может быть заменена менее трудоемкой изотермической отгонкой в чашках Конвея.

ЛИТЕРАТУРА

- Г о р б а т е н ь к и й Г. Г. 1965. Использование диффузионного метода Конвея для определения аммонийного азота в природных и сточных водах. В сб.: Биол. ресурсы водоемов Молдавии, вып. 3, изд. «Карта Молдовеняска», Кишинев.
- К о р о с т е л е в П. П. 1962. Приготовление растворов для химико-аналитических работ. Изд. АН СССР, М.
- К р а с н о в И. Б. 1959. Ультрамикрометод определения общего азота. Бюлл. эксперим. биол. и медиц., т. 48, № 7.
- М а й с т р е н к о Ю. Г. 1964. Методика определения органического вещества природных вод. В сб.: Радиоактивные изотопы в гидробиологии и методы санитарной гидробиологии, Изд. АН СССР, М.—Л.
- М я к и н а Н. Б. 1958. Видоизмененный метод определения общего азота по Кьельдалю. Почвоведение, № 1.
- Р о й з м а н И. С. 1961. Диффузионно-изотермическое микроопределение общего азота в моче. Лабораторное дело, № 1.
- Х а л и л о в К. Б. 1960. Усовершенствование парафиновой чашки для изотермической перегонки аммиака, Лабораторное дело, № 3.
- К о п w e y E. a. В y r n e. 1933. An absorption apparatus for the microdetermination of certain volatile substances. 1. The microdetermination of ammonia. Biochemi. Journ., v. 25, № 1.

РЕФЕРАТЫ

УДК 551.482.215 (47 : 282.4Г)

Формирование, распределение и трансформация водных масс Горьковского водохранилища. Эдельштейн К. К. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 13—71.

Формирование, распределение и трансформация речных и озерной водных масс Горьковского водохранилища и их влияние на биологические процессы, происходящие в водоеме. Илл. — 28, табл. — 20, библи. — 60 назв.

УДК 551.482.4 (47 : 282.4И+У)

О трансформации волжских вод в Ивановском и Угличском водохранилищах. Буторин Н. В. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 72—85.

Изменения свойств речных вод в условиях зарегулированного стока на примере Ивановского и Угличского водохранилищ. Илл. — 5, табл. — 4, библи. — 15 назв.

УДК 551.482.213.214 (47 : 282.4Р)

Исследование водных масс континентальных водоемов статистическим методом с использованием ЭВМ. Буторин Н. В. и Смирнов Н. П. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 86—99.

Статистический метод применяется для выделения водных масс в водохранилищах по комплексу различных показателей. Илл. — 4, табл. — 2, библи. — 12 назв.

УДК 551.481.215 (47 : 282.4Р) «324»

Динамика вод Волжского плеса Рыбинского водохранилища в зимний период. Литвинов А. С. и Бакулин К. А. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 100—119.

Колебания уровня, уклонов и режима течений зимой в нижнем бьефе Угличской ГЭС в связи с периодическими пропусками воды через последнюю. Илл. — 11, табл. — 5, библи. — 13 назв.

УДК 551.482.213/.214 (28)

Материалы по цветности и химическому составу вод Верхневолжского водохранилища. Рощупко В. Ф. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 120—128.

Сопоставление результатов исследований цветности и химического состава вод верховьев Волги, проведенных Институтом биологии внутренних вод АН СССР в 1964—1966 гг., с аналогичными определениями различных исследований. Классификация вод по степени окрашенности. Илл. — 1, табл. — 2, библи. — 8 назв.

УДК 551.482.213 (47 : 282.4Р) «32»

Сезонные изменения температуры дна Рыбинского водохранилища. Бакастов С. С. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 129—141.

Формирование донных температур водохранилища. Особенности распределения донных температур в отдельных частях водохранилища по сезонам. Схемы изотерм дна. Илл. — 6, табл. — 2, библи. — 7 назв.

УДК 551.482.212 (47 : 282.4Р)

Накопление донных отложений в Рыбинском водохранилище. Зиминова Н. А. и Курдин В. П. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 142—151.

Распределение мощности донных отложений на различных участках водохранилища в зависимости от гидрологического режима и морфометрии. Данные заиления по участкам за 25 лет существования водохранилища. Сопоставление расчетных и фактических величин заиления и анализ причин их несовпадения. Сравнение интенсивности заиления Рыбинского водохранилища и водохранилищ, расположенных в сходных физико-географических условиях. Илл. — 3, табл. — 4, библи. — 10 назв.

УДК 551.482.213.214 : 628.394

Изменение состава и свойств воды р. Москвы в связи с загрязнением и процессами самоочищения. Драчев С. М.

В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 152—198.

Исследование изменений солевого состава, содержания биогенных элементов, органического вещества и кислородного режима в воде реки за последние 50 лет. Закономерности хода процесса самоочищения. Илл. — 8, табл. — 30, библи. — 101 назв.

УДК 551.482.2.214 : 628.394

Изменение состава катионов в воде р. Москвы под влиянием бытовых и промышленных загрязнений в зимний период. Кобякова Н. А. В сб.: Химизм водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 199—204.

Изменения содержания кальция, магния, натрия и калия под влиянием бытовых и промышленных стоков г. Москвы. Табл. — 6, библи. — 6 назв.

УДК 628.3 (28)

Загрязнение р. Москвы металлами, содержащимися в промышленных и бытовых сточных водах г. Москвы. Кольцов Г. В. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 205—216.

Содержание и дальность распространения металлов (медь, хром, никель, свинец, молибден, серебро) по р. Москве. Основные источники поступления и формы миграции металлов. Илл. — 4, табл. — 8, библи. — 9 назв.

УДК 546.18 : 551.482.214 : 546.18 (47 : 282.4P) «32»

Минеральный и органический фосфор в воде Рыбинского водохранилища в 1965 г. Монакова С. В. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 217—222.

Сезонное изменение содержания общего и минерального фосфора. Илл. — 4, табл. — 1, библи. — 11 назв.

УДК 547.466 : 551.481 (47 : 282.4P) «32»

О содержании аминокислот в воде Рыбинского водохранилища. Трифонова Н. А. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и само-

очищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 223—228.

Результаты определений суммарного содержания свободных аминокислот в разных частях Рыбинского водохранилища. Сезонные изменения содержания аминокислот. Данные о содержании аминокислот в кислых гидролизатах органического вещества, растворенного в воде, и результаты хроматографического разделения свободных аминокислот из нескольких проб наименее цветных вод. Илл. — 2, табл. — 1, библи. — 10 назв.

УДК 628.3 : 539.16 (28)

Содержание и распределение долгоживущих продуктов деления в водохранилищах Верхней Волги. Былинкина А. А. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 229—239.

Изучение загрязнений воды и донных отложений водохранилищ радиоактивными выпадениями из атмосферы. Определение возраста и состава выпадений в период наблюдений. Сравнение значений суммарной β -активности проб донных отложений, не разделенных на фракции, и проб тонкодисперсной фракции. Наблюдения над снижением активности проб ила с течением времени и определение периода полураспада β -излучателей. Изучение распределения долгоживущих продуктов деления в донных отложениях водохранилищ. Илл. — 1, табл. — 8, библи. — 20 назв.

УДК 535.379 : 543.3 (28)

К применению хемилюминесцентной реакции окисления люминола для характеристики качества воды в водоеме. Синельников В. Е. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). 1968. Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 240—246.

Определение активности веществ, инигибирующих цепной окислительный процесс, с помощью хемилюминесцентной реакции на р. Волге от Конаково до Коприно и на р. Москве ниже столицы. Поступление веществ-антиокислителей со сточными водами в водоемы и прослеживание их влияния. Обнаружение в природных водах инициаторов цепных окислительных реакций, проявляющих себя как усилители интенсивности хемилюминесценции. Илл. — 2, табл. — 1, библи. — 9 назв.

УДК 546.17 : 551.48 (28)

Использование диффузионно-изотермической дистилляции аммиака для определения органического азота в природных водах. Т р и ф о н о в а Н. А. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, Тр. Инст. биологии внутренних вод АН СССР, вып. 18 (21). Изд-во «Наука», Ленингр. отд., Л. 247—249.

Использование диффузионно-изотермической дистилляции аммиака позволяет проводить определение органического азота в небольших объемах проб воды. Метод характеризуется довольно высокой чувствительностью (1 мкг N в пробе) и вполне удовлетворительной точностью (среднее отклонение $\pm 3\%$), а также простотой выполнения определений, несложностью применяемого оборудования и малой потребностью в реактивах. Табл. — 1, библи. — 8 назв.

	Стр.
К. К. Э д е л ь ш т е й н. Формирование, перемещение и трансформация водных масс Горьковского водохранилища	3
Н. В. Б у т о р и н. О трансформации волжских вод в Ивановском и Угличском водохранилищах	72
Н. В. Б у т о р и н и Н. П. С м и р н о в. Исследования водных масс континентальных водоемов статистическим методом с использованием ЭВМ	86
А. С. Л и т в и н о в и К. А. Б а к у л и н. Динамика вод Волжского плеса Рыбинского водохранилища в зимний период	100
В. Ф. Р о щ у п к о. Материалы по цветности и химическому составу вод Верхневолжского водохранилища	120
С. С. Б а к а с т о в. Сезонные изменения температуры дна Рыбинского водохранилища	129
Н. А. З и м и н о в а и В. П. К у р д и н. Накопление донных отложений в Рыбинском водохранилище	142
С. М. Д р а ч е в. Изменения химического состава и свойств воды р. Москвы в связи с загрязнением и процессами самоочищения	152
Н. А. К о б я к о в а. Изменения состава катионов в воде р. Москвы под влиянием бытовых и промышленных загрязнений в зимний период	199
Г. В. К о л ь ц о в. Загрязнение р. Москвы металлами, содержащимися в промышленных и бытовых сточных водах г. Москвы	205
С. В. М о н а к о в а. Минеральный и органический фосфор в воде Рыбинского водохранилища в 1965 г.	217
Н. А. Т р и ф о н о в а. О содержании аминокислот в воде Рыбинского водохранилища	223
А. А. Б ы л и н к и н а. Содержание и распределение долгоживущих продуктов деления в водохранилищах Верхней Волги	229
В. Е. С и н е л ь н и к о в. К применению хемилюминесцентной реакции окисления люминола для характеристики качества воды в водоеме	240
Н. А. Т р и ф о н о в а. Использование диффузионно-изотермической дистилляции аммиака для определения органического азота в природных водах	247
Р е ф е р а т ы	250

CONTENTS

	Pp.
K. K. Edelstein. Formation, transference and transformation of water masses in the Gorky reservoir	3
N. V. Butorin. Transformation of Volga waters in the Ivankovo and Uglich reservoirs	72
N. V. Butorin and N. P. Smirnov. Study of continental reservoirs water masses by statistical method with electronic computer	86
A. S. Litvinov and K. A. Bakulin. Waters dynamics in the Volga reach of the Rybinsk reservoir in winter	100
V. F. Roshupko. Colourity and chemical composition of waters of the Upper-Volga reservoir	120
S. S. Bakastov. Seasonal changes of temperature of the Rybinsk reservoir bottom	129
N. A. Siminova and V. P. Kurdin. Accumulation of clastic deposits in the Rybinsk reservoir	142
S. M. Drachev. Changes of chemical compound and characteristics of the Moscow river water, caused by pollutions and selfpurification processes . .	152
N. A. Kobyakova. Change of kathions compound in water of the Moscow river under the influence of domestic and industrial pollutions in winter	199
G. V. Koltsov. Pollution of the Moscow river by metals contained in industrial wastes and sewages of Moscow	205
S. V. Monakova. Mineral and organic phosphorus in the Rybinsk reservoir waters in 1965	217
N. A. Trifonova. Content of aminoacids in the Rybinsk reservoir water	223
A. A. Bylinkina. Content and distribution of long-lived fission products in the Upper-Volga reservoirs	229
V. E. Sinelnikov. Use of chemiluminescence reaction of luminol oxidation for characteristic of water quality in reservoir	240
N. A. Trifonova. Use of diffusive isothermal ammonia distillation for determination of organic nitrogen in natural waters	247
Abstracts	250

ХИМИЗМ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ
И ФАКТОРЫ ИХ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И САМООЧИЩЕНИЯ

Труды Института биологии внутренних вод
АН СССР, вып. 18 (21)

*Утверждено к печати
Институтом биологии внутренних вод Академии наук СССР*

Редактор издательства С. Н. Борхсениус

Художник Д. С. Днилов

Технический редактор Е. Н. Волкова

Корректоры А. А. Гинзбург, Н. И. Журавлева
и Г. В. Семерикова

Сдано в набор 20/VI 1968 г. Подписано к печати 21/XII 1968 г.
РИСО АН СССР № 23а-80В. Формат бумаги 70×108¹/₁₆.
Бум. л. 8. Печ. л. 16 = 22.40 усл. печ. Уч.-изд. л. 21,43.
Изд. № 3771. Тип. зак. 1157. М-46571. Тираж 1550. Бумага
№ 2. Цена 1 р. 54 к.

Ленинградское отделение издательства «Наука»
Ленинград, В-164, Менделеевская лин., д. 1

1-я тип. издательства «Наука». Ленинград, В-34, 9 лин., д. 12