

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ВНУТРЕННИХ ВОД

Н. В. БУТОРИН

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ
И ДИНАМИКА
ВОДНЫХ МАСС
В ВОДОХРАНИЛИЩАХ
ВОЛЖСКОГО
КАСКАДА



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
Ленинград 1969

ACADEMY OF SCIENCES OF THE USSR
BIOLOGICAL INSTITUTE FOR INLAND WATERS RESEARCH

N. V. BUTORIN

HYDROLOGICAL PROCESSES AND DYNAMICS
OF WATER MASSES IN THE VOLGA CASCADE
RESERVOIRS

УДК 551.48; 628.113

Буторин Н. В. Гидрологические процессы и динамика водных масс в водохранилищах Волжского каскада.

Волга является классическим примером регулирования стока большой равнинной реки каскадом водохранилищ. На примере ее рассматривается изменение гидрологических условий реки в связи с зарегулированием стока и формирование гидрологического режима водохранилищ различного типа.

В результате многолетнего изучения элементов гидрологического режима волжских водохранилищ установлен ряд закономерностей их изменения по сезонам и из года в год, выявлены особенности уровня и температурного режимов, распределения скоростей течения, прозрачности и цветности, содержания взвесей, показана роль отдельных элементов режима в развитии биологических процессов.

Установлено, что отличительной чертой этих водоемов от других водных объектов является своеобразие водного баланса и гетерогенность водных масс. Длительное пребывание речных вод в более или менее однородных климатических, геологических и биологических условиях влечет за собой превращение их в определенную водную массу, отличающуюся от исходных вполне конкретными свойствами: температурой, электропроводностью, цветностью, прозрачностью, газовым и химическим составом. Наличие в водохранилищах водных масс с различными свойствами придает их гидрологическому режиму специфические особенности. Основной из них является накопление вещества и энергии в водоеме.

Четкое представление о водных массах волжских водохранилищ и их динамике может служить основой для расчета балансовых характеристик, позволяет оценить санитарное состояние водоемов и определить пути хозяйственного использования.

Библ. 333 назв., илл. 134, табл. 123.

Ответственный редактор

член-корр. АН СССР *С. И. Кузнецов*

Редактор издания

доктор биол. наук *Б. К. Штегман*

ПРЕДИСЛОВИЕ

Многолетние исследования водохранилищ Советского Союза дали обширный материал, характеризующий их уровень и температурный режим, процессы вскрытия и замерзания, донные отложения, солевой и газовый состав и биологическую продуктивность. Результаты этих исследований, в частности гидрологических, гидрохимических и санитарно-технических, обсуждались на III Всесоюзном гидрологическом съезде в 1957 г. и опубликованы в трудах этого съезда. Однако за последнее десятилетие произошли изменения в самой структуре исследования водохранилищ — как в методическом отношении, так и в подходе к изучению гидрологических процессов. К настоящему времени обработана и опубликована лишь незначительная часть накопленных за это десятилетие данных, большинство из которых в основном касается частных вопросов гидрологии водохранилищ.

Так же обстоит дело и в отношении водохранилищ волжского каскада. Необходимость научного обобщения многолетних и широко поставленных здесь гидрологических исследований назрела уже давно. В составлении по возможности более полных характеристик особенностей гидрологического режима водохранилищ и качества их вод заинтересованы прежде всего проектные и хозяйственные организации. Знание этих особенностей необходимо при выборе рационального пути использования ресурсов водоемов, в частности при решении задач, связанных с питьевым и промышленным водоснабжением и санитарной охраной водоемов, а также транспорта, энергетики, орошения, рыбного хозяйства и внутренних водоемах. С гидрологическими процессами, как известно, связаны биологическая продуктивность водохранилищ, первичная продукция, пищевые взаимоотношения между водными организмами на разных стадиях процесса круговорота органического вещества, поведение рыб, их питание и размножение.

В последнее время все сильнее ощущается необходимость применения более совершенной методики исследований гидрологического режима. Существующая методика упускает ряд существенных особенностей физических процессов, происходящих в водохранилищах. Обоснование новых схем постановки наблюдений и использование современной техники для измерения элементов гидрологического режима водохранилищ на основе имеющегося опыта и последних достижений в смежных областях

знаний, особенно в океанологии, позволит раскрыть новые особенности режима искусственных водоемов, о которых в настоящее время мы лишь предполагаем.

Водохранилища волжского каскада представляют благоприятный объект для подобного обобщения. По большинству из них накоплены обширные материалы стационарных и экспедиционных наблюдений, которые проводились обсерваториями и специализированными озерными станциями Гидрометеослужбы, учреждениями Академии наук СССР и различными ведомственными организациями. Значительная часть экспедиционных исследований была проведена лабораторией гидрологии Института биологии внутренних вод АН СССР при участии и под руководством автора. Эти материалы характеризуют различные этапы формирования и развития гидрологических процессов в водохранилищах каскада. Большинство из них получено по единой схеме и единой методике с охватом полного годового цикла. Частично они обработаны и опубликованы в работах автора, М. А. Фортунатова (1959), В. П. Курдина (1959, 1961), Н. А. Зиминевой (1963), В. И. Рутковского (1963, 1964), К. К. Эдельштейна (1963б, 1965а), С. С. Бакастова (1963, 1965) и А. С. Литвинова (1965, 1966).

Считаю своим приятным долгом выразить глубокую благодарность за постоянное внимание к работе и ценные советы Л. Л. Россолимо, Б. Б. Богословскому и С. И. Кузнецову. Выражаю также большую признательность за просмотр рукописи и ценные замечания Н. П. Смирнову и Т. Н. Курдиной, а за участие в полевых работах и обработку материалов — К. К. Бакулину, Н. М. Сизовой, И. С. Ильину, Л. А. Угаровой и М. И. Миловидовой.

ВВЕДЕНИЕ

Общие сведения о водохранилищах

Водохранилищем в широком смысле слова принято считать любой водоем замедленного водообмена с искусственно регулируемой емкостью и зеркалом. При таком толковании исчезает принципиальное различие между водохранилищами и прудами (Поддубный и Фортунатов, 1961); на этом основании водоснабженческие и санитарно-гигиенические организации СССР относят к водохранилищам все пруды, емкость которых превышает 1 млн м³ (Драчев, 1956). В США, согласно Томасу и Харбеку (Thomas a. Harbeck, 1956), водохранилищами принято считать водоемы, полезный объем которых составляет более 5 тыс. акрофутов, т. е. 6.16 млн м³. Водоемы же с меньшей емкостью относят к прудам. В большинстве стран Западной Европы водохранилищами считаются водоемы и с меньшей емкостью, но если их водообмен обеспечивается инженерными сооружениями.

По данным М. А. Фортунатова (табл. 1), число водохранилищ с полезной емкостью более 1 млн м³ к июлю 1962 г. составило 3332, а общее

Т а б л и ц а 1

Количество водохранилищ с полезной емкостью более 1 млн м³
в различных частях света
(по М. А. Фортунатову, 1963)

Часть света	Полезная емкость, млн м	Общее число известных водохранилищ	Всего
Америка	1480	179	1659
Европа	1164	388	1552
Азия	519	117	636
Африка	89	51	140
Австралия (в том чи- сле Океания) . . .	80	36	116
Всего	3332	771	4103

число — 4103. По общему количеству учтенных на 1960—1961 гг. искусственных водоемов с полезной емкостью более 1 млн м³ первое место в мире занимает Америка, второе — Европа. Сведения о количестве и суммарной полезной емкости водохранилищ по странам, в которых имеется наибольшее число зарегулированных водоемов, представлены в табл. 2.

Приведенные цифры могут рассматриваться только как ориентировочные, отражающие число и емкость эксплуатирующихся и строящихся водохранилищ.

Значительная часть водохранилищ Советского Союза имеет большую полезную емкость. Наиболее крупные из них (как действующие, так и строящиеся) названы в табл. 3.

Число водохранилищ, созданных в СССР на малых реках для выработки электроэнергии, орошения, обводнения, водоснабжения и других нужд народного хозяйства, исчисляется тысячами. Несмотря на различия в величинах площади, объема, протяженности и средней глубины, все

Т а б л и ц а 2
Страны с наибольшим количеством водохранилищ
(по М. А. Фортунатову, 1963)

Страна	Общее число известных водохранилищ	Число водохранилищ с учтенной полезной емкостью	Суммарная полезная емкость, млн м
США	1350	1322	415043
СССР	408	251	358511
Испания	244	235	29852
Япония	228	205	7607
Италия	217	211	7497
Франция	166	139	8414
Канада	110	56	211266
Индия	105	88	107390
Австралийский Союз	84	57	23439
Англия	80	33	3900
Швейцария	77	71	3467
ФРГ	63	52	1807
Чехословакия	63	48	1733
КНР	59	42	134468
Мексика	59	24	45090
Швеция	52	30	24988
Австрия	45	44	1411
ГДР	41	27	691
Югославия	38	27	7320
Южно-Африканская республика	38	22	4291
Норвегия	36	19	9300
Польша	28	12	2500
Финляндия	25	13	8646
Португалия	25	21	3570
Новая Зеландия . . .	24	19	6086

водохранилища относятся к водоемам замедленного водообмена. Основное назначение этих водоемов — искусственное регулирование стока — лежит в основе самого их возникновения и существования и обуславливает своеобразие их водного баланса. Поскольку водный баланс и баланс всех элементов, которые связаны с водой, составляет единое целое, то естественно, что вся совокупность гидрологических, гидрохимических и биологических процессов в водохранилищах зависит от особенностей водного баланса. Изучение этих особенностей с целью практического использования водоема в различных отраслях народного хозяйства является в настоящее время первоочередной задачей. В процессе такого исследования следует, однако, помнить, что водохранилище, как и всякий водный объект, «представляет собой сложнейший, но единый комплекс процессов и явлений, из которых ни одно, даже самое незначительное, не может быть вырвано и рассматриваемо вне связи со всем комплексом» (Россолимо, 1934, стр. 16).

Т а б л и ц а 3

Наиболее крупные водохранилища СССР
(по Е. В. Блваняку и В. Г. Андреянову, 1958)

Река	Водохранилище	Площадь зеркала, км	Напор, м	Емкость, км	
				полная	полезная
Нижний Выг	Выгозерское	1200	13.5	—	1.2
Волга	Иваньковское	330	11	1.2	0.9
»	Угличское	220	11	1.3	0.6
»	Рыбинское	4550	18	25.4	11.7
»	Горьковское	1570	17	8.7	2.8
»	Куйбышевское	6450	28	58.0	34.6
»	Чебоксарское	3750	20	24.8	15.6
»	Саратовское	2180	14	15.4	—
»	Волгоградское	3170	22	33.5	6.6
Кама	Камское	1930	21	10.7	6.7
»	Воткинское	1120	24	9.7	3.9
Днепр	Днепровское им. В. И. Ленина	410	36	3.3	1.4
»	Каховское	2150	16	18.2	7.0
»	Кременчугское	2300	17	13.5	9.0
»	Днепродзержинское	567	12	2.5	—
Дон	Цимлянское	2700	27	23.9	11.5
Кура	Мингечаурское	605	65	16.1	7.4
Обь	Новосибирское	1070	20	8.8	4.4
Ангара	Иркутское	32570	30	23500	68.8
»	Братское	5500	102	179.1	50.0
Сырдарья	Кайрак-Кумское	510	25	4.2	2.1
Иртыш	Бухтарминское	5500	67	53.0	31.0
Енисей	Красноярское	2130	101	77.5	32.1

П р и м е ч а н и е. Характеристики Выгозерского водохранилища даны с учетом оз. Выгозера Иркутского — оз. Байкал, Бухтарминского — оз. Зайсан.

Краткий исторический обзор исследований водохранилищ волжского каскада

Мысль о создании водохранилищ на Волге с целью улучшения судоходства зародилась еще в XVIII в. В 1764 г., например, коллежский советник Сердюков выступил с проектом запруды р. Селижаровки. В 1805—1807 гг. в соответствии с проектом Гергарда 2-го в районе верхне-волжских озер проводились изыскания с целью определения возможности постройки здесь плотины, регулирующей сток этих озер. Работы по сооружению плотины при истоке Волги из оз. Пено были начаты в 1808—1809 гг., но в силу ряда обстоятельств, прежде всего Отечественной войны 1812 г., они были прекращены.

В 40-е годы XIX в. проект создания водохранилища в верховьях Волги вновь вызывает к себе интерес. Было решено соорудить водохранилище в 8 верстах выше устья р. Селижаровки и в 4 верстах ниже оз. Волго, и в 1843 г. была построена плотина (бейшлот) у сел. Хотошина. Так, в результате слияния вод Верхней Волги и озер Стержа, Вселуга, Пено и Волго свыше 100 лет назад возникло первое водохранилище волжского каскада.

Первые систематические наблюдения за температурой, цветом и прозрачностью воды этого водохранилища были проведены в 1894—1896 гг. под руководством И. В. Бушмакина. Кроме того, при этих исследованиях выполнялись промеры глубин, топографическая съемка и эпизодические наблюдения над уровнем воды. Полученные материалы

помещены в работах Д. Н. Анучина (1897, 1898) и И. В. Бушмакина (1898, 1902, 1904). Они и положили начало изучению водохранилищ волжского каскада.

В том же проекте Гергарда 2-го высказывалась мысль о создании и другого водохранилища в верховьях Волги — из оз. Селигер. К началу 60-х годов прошлого столетия подобный проект был разработан, но только в 1890 г. Министерство путей сообщения постановило «признать сооружение Селижаровского водохранилища безотлагательным, как самую целесообразную меру для скорого, дешевого и решительного улучшения судоходных условий р. Волги между городами Тверью и Рыбинском» (Анучин, 1897, стр. 5). Однако, несмотря на принятые меры, проект строительства Селижаровского водохранилища не был осуществлен.

Только после Великой Октябрьской социалистической революции, когда необходимость электрификации страны вызвала бурное развитие гидроэнергостроительства, создание водохранилищ на Волге приобрело невиданный размах. Уже в 1937 г. возникло Ивановское водохранилище, а в 1939 г. после окончания строительства Угличской ГЭС образовалось Угличское водохранилище.

Началось интенсивное исследование этих водоемов. В 1937 г. Всесоюзный научно-исследовательский институт прудового рыбного хозяйства (ВНИПРХ) разработал биологические и технические обоснования рыбохозяйственного использования Ивановского водохранилища, в которых приведены некоторые данные, характеризующие гидрографические особенности, гидрологический и гидрохимический режимы водоема и рек в районе водохранилища.

В 1938—1939 гг. Гидропроектом ведутся исследования термического и ледового режимов Волги в нижнем и верхнем бьефах Ивановской плотины. В эти же годы собраны некоторые данные по зимнему термическому режиму водоема Государственным гидрологическим институтом (ГГИ). Накопленные материалы позволили Б. М. Себенцову, Д. И. Биск и Е. В. Мейснер (1940) составить характеристику зимних условий Ивановского водохранилища, а А. П. Щербакову (1939, 1941) описать основные черты гидрохимического режима этого водоема.

Первые сведения о гидрологическом и гидрохимическом режимах Угличского водохранилища имеются в материалах ВНИПРХ за 1943 г. Более подробные данные — о морфометрических особенностях, водном балансе и гидрохимическом режиме Угличского водохранилища — приводятся в работе Б. М. Себенцова и Е. В. Мейснер (1947). В эти же годы Ленгипроречтрансом проводится изучение влияния плотины Угличской ГЭС на заиление реки.

Особенно расширились исследования водохранилищ после завершения строительства Рыбинского гидроузла. В 1941 г. началось заполнение Рыбинского водохранилища, одного из крупнейших искусственных водоемов нашей страны. Первоначально здесь, как и на других водоемах подобного типа, проводились преимущественно экспедиционные работы. Уже в годы заполнения водохранилища Рыбинской гидрометеорологической обсерваторией выполнялись наблюдения за скоростью и направлением течений. В 1944 г. Ленгипроречтранс осуществлял исследование ветро-волнового, ледового и термического режимов водохранилища, а Гидропроект проводил изучение термического и ледового режимов в верхнем и нижнем бьефе Рыбинской ГЭС.

Однако для установления закономерностей процессов, протекающих в водохранилищах, и разработки методики прогнозов гидрологического и метеорологического режимов проектируемых водохранилищ экспедиционный метод исследований оказался недостаточным. Поэтому с самого начала заполнения Рыбинского водохранилища Московское управление

Гидрометеослужбы организовало сеть гидрометеорологических станций и постов на побережье водохранилища, наблюдения которых могли дать первичный материал. В 1942 г. в пос. Переборы была организована базовая гидрометеорологическая станция, преобразованная в 1944 г. в Рыбинскую гидрометеорологическую обсерваторию. Обсерватория, помимо оперативного обслуживания судоходства гидрометеорологическими информацией и прогнозами режима водохранилища, проводила специальные исследования водного баланса водоема, разрабатывала метод прогноза притока воды в него и составляла характеристики волнового и ледового режимов.

В процессе этих исследований выяснилось, что для решения ряда вопросов и прежде всего для определения величины испарения с водной поверхности и волнового режима требуется организация широких наблюдений в открытой части водохранилища. С этой целью Государственным гидрологическим институтом и Рыбинской гидрометеорологической обсерваторией в 1946 и 1947 гг. были проведены широкие комплексные исследования Рыбинского водохранилища, направленные на изучение его водного баланса, испарения, волнения, уровня, ледового и термического режимов и химического состава вод.

Данные, полученные в результате этих наблюдений на Рыбинском водохранилище в 1941—1947 гг., внесли существенный вклад в гидрологическое исследование этого водохранилища. Они не только способствовали уточнению первого гидрологического очерка о Рыбинском гидроузле, составленного Гидропроектом в 1936 г., и гидрологической характеристики водоема, предложенной в 1944 г. ВНИПРХ, но позволили также разработать ряд теоретических вопросов по гидрологии озер и водохранилищ.

Наряду с организациями Гидрометеослужбы исследования Рыбинского водохранилища проводили в эти годы и другие учреждения. Так, Морской гидрофизической лабораторией АН СССР в 1941 и 1942 гг. осуществлялось изучение особенностей развития волновых процессов (Иванов, 1948; Левченко, 1949). В 1943 г. такие работы выполнялись Московским отделением Центрального научно-исследовательского института речного флота, а в 1944 г. — Верхне-Волжским бассейновым управлением пути. К этому же периоду относятся наблюдения Института географии АН СССР, связанные с исследованием эволюции береговой полосы Рыбинского водохранилища и определением факторов, влияющих на формирование его берегов (Живаго, 1951, 1954).

Биологической станцией «Борок» АН СССР при гидробиологических и ихтиологических исследованиях изучался гидрологический режим Рыбинского водохранилища, в частности влияние на него затопленных территорий (Овчинников, 1950), гидрохимические особенности отдельных районов водохранилища и физико-химические свойства донных (иловых) отложений (Кудрявцев, 1950а, 1950б).

Для составления прогноза рыбохозяйственного освоения Рыбинского водохранилища большие работы выполнялись Всесоюзным научно-исследовательским институтом озерного и речного рыбного хозяйства (ВНИОРХ). Полученные данные и послужили основой для составления прогнозов гидрохимического и гидробиологического режимов водохранилища.

Широкая постановка стационарных и экспедиционных исследований Рыбинского водохранилища позволила составить монографическое описание водоема. В 1950 и 1951 гг. Государственным гидрологическим институтом совместно с Рыбинской гидрометеорологической обсерваторией издается ряд сборников статей, посвященных исследованию Рыбинского водохранилища. В них обстоятельно освещается история проекти-

рования водохранилища, способы подготовки его ложа к затоплению, форма водоема, а также рассматриваются вопросы заиления, всплывания торфяников, притока и стока, уровня режима, сгонов и нагонов, ледового режима, волнения, водного баланса, испарения и термического режима.

Особый интерес представляют результаты исследования гидрохимического режима (Воронков, 1951а, 1951б, 1951в). Помимо сведений о сезонном изменении минерализации воды и питательных солей, удалось выявить некоторые особенности распределения вод разного происхождения. При этом было установлено, что изучение и характеристика распределения вод разных источников, изменения положения их границ и гидрологических процессов в водохранилищах возможны лишь при охвате всей площади водоема достаточно большим числом станций. Данное положение впоследствии было учтено нами при исследовании водных масс водохранилищ волжского каскада.

В 1953 г. Московское общество испытателей природы выпустило сборник статей, посвященный изучению изменений природы побережья Рыбинского водохранилища (Рыбинское водохранилище, 1953).

Несмотря на ценные результаты, полученные различными организациями при исследованиях Рыбинского водохранилища в первые годы его существования, ряд существенных вопросов, связанных с гидрологией водоема, не получил научного освещения. Сюда прежде всего относятся гидродинамические процессы и процессы формирования дна водохранилища. Эти два процесса тесно связаны друг с другом. Гидродинамические процессы в таких больших водохранилищах, как Рыбинское, в значительной мере регулируют и направляют процессы отложения, переотложения и перераспределения всего материала, поступающего в водоем и идущего на формирование донных отложений. Исследование процесса формирования донных отложений представляет не только научный интерес, но имеет также большое практическое значение.

Основные закономерности термического режима водохранилищ в зимних условиях были установлены С. Н. Крицким, М. Ф. Менкелем и К. И. Россинским (1947). Одновременно интенсивно велось изучение неустановившегося режима нижних бьефов гидроэлектростанций (Гильденблат и др., 1948).

В процессе эксплуатации Иваньковского, Угличского и Рыбинского водохранилищ выявился еще ряд вопросов, решение которых потребовало дальнейшего расширения исследований гидрометеорологического режима созданных водохранилищ. Это было важно и для вновь проектируемых водоемов подобного типа. При проектировании нового водохранилища возникает необходимость расчета всех элементов водного баланса, термического и ледового режимов, режима волнения и циркуляции вод, что в свою очередь требует знания целого ряда метеорологических элементов над поверхностью водоема.

Комплексное изучение водохранилищ важно не только для проектирования и строительства новых водоемов, но и для решения вопросов, связанных с рациональным использованием водных ресурсов уже созданных водохранилищ. В связи с этим исследовательские работы на волжских водохранилищах систематически расширяются. Наряду с изучением особенностей термического режима (Курдина, 1956, 1958; Тачалов, 1959) и наблюдениями за переформированием берегов (Акимов, 1953; Архангельский, 1954; Белых, 1956; Золотарев, 1954; Иванов, 1959) началось исследование формирования донных отложений (Россолимо, 1950; Курдин, 1959; Сорокин, 1958) и скоростного режима водохранилищ (Кренке, 1958). В весенний и осенний периоды стали систематически проводиться ледовые авиаразведки. Приступили к разработке

методики составления краткосрочного прогноза замерзания зарегулированных рек (Балашова, 1954) и методики прогноза ледовых затруднений на ГЭС (Тачалов, 1957).

В 1956 г. было проведено гидрографическое обследование береговой полосы островов и сплавин, а также картирование затопленных лесов и прибрежной водной растительности Рыбинского водохранилища. К этому времени относится организация работ на водоеме, направленных на изучение его как источника хозяйственно питьевого водоснабжения (Драчев, Сологуб, 1956).

В 1955 г. началось заполнение Горьковского и Кузнецовского водохранилищ. С этого момента Институт биологии внутренних вод АН СССР приступил к комплексному исследованию их режима с целью составления гидрологической характеристики вновь созданных водохранилищ как основы их гидробиологического и гидрохимического изучения. Гидрологический режим этих водохранилищ в годы заполнения рассматривался в сопоставлении с гидрологическим режимом Волги. Процесс изменения гидрологического режима реки в переходный период от естественного состояния к условиям водохранилища был прослежен нами на примере Горьковского водохранилища (Буторин, 1958а, 1958б, 1959а, 1959б). Исследование элементов гидрологии реки и изучение тех изменений, которые произошли в зоне подпора в период заполнения водохранилища, способствовали выявлению некоторых общих закономерностей гидрологического режима водохранилищ.

Одновременно с Институтом биологии внутренних вод АН СССР на вновь созданных водохранилищах развернули исследовательские работы и другие организации. Среди них прежде всего следует отметить Гидрометеослужбу, которая создала на Горьковском и Кузнецовском водохранилищах сеть гидрометеорологических станций и постов и открыла гидрометеорологические обсерватории. Большие работы на этих водохранилищах проводились Всесоюзным научно-исследовательским институтом озерного и речного рыбного хозяйства и его отделениями, а также университетами и другими учреждениями.

Характерной особенностью исследований водохранилищ в этот период является комплексный подход к изучению протекающих в них процессов. Комплексное направление, подробно разработанное в ряде работ Е. В. Близняка, наряду с гидрологическими исследованиями включает также метеорологические, гидрохимические, гидробиологические, геоботанические и санитарно-технические наблюдения. При таком изучении водохранилищ экспедиционные работы, как правило, сочетаются с широкой программой стационарных наблюдений.

Использование обширных данных стационарных и экспедиционных наблюдений, а также применение новых методов и современной аппаратуры позволили советским ученым создать методологические и теоретические основы изучения водохранилищ. Заметные успехи в этой области были достигнуты уже к III Гидрологическому съезду (Близняк, Андреянов, 1958). В отличие от первых двух съездов в составе III съезда работала секция озер и водохранилищ. Около половины заслушанных на ней докладов было посвящено водохранилищам. Если учесть, что такие вопросы, как изучение и расчет метеорологического режима над водохранилищами, испарение с их поверхности, региональные гидрохимические характеристики, а также разработка и использование новых приборов и аппаратуры рассматривались на других секциях, то становится очевидным, какое значительное место занимала проблема водохранилищ в работе съезда.

Подведение итогов и определение основных направлений и задач дальнейшего исследования водохранилищ на III Гидрологическом съезде

способствовали расширению работ и на водохранилищах волжского каскада. В результате обширных наблюдений, проведенных различными организациями и учреждениями, были получены интересные данные, раскрывающие закономерности процессов, протекающих в указанных водоемах. Это прежде всего относится к области изучения водного баланса. В работах Ф. И. Белых, Г. К. Банновой, П. И. Никулина В. И. Рутковского и Т. Н. Курдиной, Е. А. Зайцевой, В. И. Колкутина уточнена методика исследований и расчета водного баланса водохранилищ различного типа и определена точность расчета компонентов составляющих водного баланса. Ф. И. Белых, Н. В. Буториным, П. И. Никулиным, В. Д. Савиной, В. И. Колкутиным получены новые данные по уровенному режиму водохранилищ. Авторы показали причины колебаний уровня, их особенности в отдельных водоемах и определили абсолютную величину колебаний по сезонам года. Особое внимание обращено на изучение сгонно-нагонных явлений на водохранилищах.

В это же время продолжались наблюдения над всеми элементами волн на водохранилищах каскада для решения некоторых задач по ветровому волнению, совершенствовалась методика наблюдений и велась разработка новых приборов для изучения ветрового волнения. Здесь следует отметить работы В. Б. Вайсбанда, В. Ф. Гущина, Е. М. Федуловой.

За последние 10 лет значительные успехи достигнуты в области изучения течений. В исследованиях А. В. Караушева, а также в работах Н. В. Буторина, Н. А. Ярославцева, П. Ф. Чигиринского и А. С. Литвинова показано изменение скоростного режима реки при зарегулировании стока, кроме того, намечены районы устойчивых стоковых течений в водохранилищах, выявлены их особенности и величина скоростей, дана гидравлическая характеристика потока нижних бьефов ГЭС и получены некоторые данные о ветровых течениях на водохранилищах.

Изучение гидродинамических процессов в волжских водохранилищах велось одновременно с исследованиями формирования донных отложений, режима водных взвесей и переформирования берегов. В работах В. П. Курдина, В. М. Широкова приводится характеристика современных донных отложений в водохранилищах, описывается их распределение, механический состав и физические свойства. Авторы раскрывают характер размыва мелководий и дна, определяют районы, где идет интенсивный процесс заиления, и выявляют роль отдельных грунтообразующих факторов. Н. А. Зиминской установлены общие закономерности сезонных изменений количества и состава взвесей и показаны основные факторы, их определяющие.

Наиболее обстоятельные исследования формирования подводного рельефа и переформирования берегов волжских водохранилищ выполнены В. М. Широковым, Л. Б. Иконниковым и В. С. Ивановым. Ими рассматриваются вопросы формирования рельефа мелководий и глубоководных участков, приводится характеристика рельефа дна водохранилищ и описываются процессы переформирования берегов.

В области исследования закономерностей термического режима водохранилищ, их теплового баланса и ледовых явлений следует отметить работы В. И. Рутковского, Н. В. Буторина, С. Н. Тачалова, Е. А. Зайцевой, П. А. Ясонова, В. В. Пиотровича и других авторов. При изучении термического режима водохранилищ наибольшее внимание уделялось особенностям формирования горизонтального распределения температуры воды после вскрытия и в период ледостава, а также формированию подледных температур и температур дна. С. С. Бакастовым и С. Н. Тачаловым при изучении донных температур вычислялись теплофизические коэффициенты грунтов. Определение коэффициентов переноса тепла для

основных разновидностей грунтов и установление их зависимости от физических свойств донных отложений имеет существенное значение для расчета теплозапаса в грунтах и, следовательно, для расчета теплового баланса водохранилищ.

Своеобразие гидрологического режима водохранилищ потребовало усовершенствования методики разработки соответствующих приборов для измерения тех или иных элементов режима и поиска путей изучения режима в целом. Это нашло отражение в работах В. Б. Вайсбаума, В. И. Рутковского, Н. В. Буторина, К. К. Эдельштейна, А. С. Литвинова, С. С. Бакастова и др.

Изучение элементов гидрологического режима волжских водохранилищ в период заполнения и в последующие годы позволило в ряде случаев проверить и оценить данные предварительного прогноза некоторых элементов гидрологического режима. При исследовании гидрологического режима водохранилищ было установлено наличие в них водных масс различного происхождения, выявлены наиболее характерные показатели водных масс и изучено их распределение, перемещение и трансформация в водохранилищах различного типа. Эти вопросы рассмотрены в работах Н. В. Буторина, К. К. Эдельштейна, М. Г. Еришовой.

Наряду с гидрологическими исследованиями в последние годы получили широкое развитие работы по гидрохимии, ихтиологии, гидробиологии и санитарному состоянию волжских водохранилищ. В большинстве случаев такое изучение ведется комплексно по единой методике при усиливающейся координации работ между различными организациями. На это указывается, в частности, в решении Первого научно-технического совещания по вопросам изучения Куйбышевского водохранилища, проходившем с 13 по 17 августа 1962 г. в г. Тольятти.

С расширением и углублением исследований гидрометеорологического и гидробиологического режимов водохранилищ большое значение приобретает изучение круговорота вещества и энергии в озерных водоемах. Исследование этих вопросов позволяет разработать научные обоснования эффективного освоения ресурсов озер и водохранилищ, а также изыскать пути их сохранения и обогащения при комплексном использовании. Как показало совещание, созванное Лимнологическим институтом Сибирского отделения АН СССР и проходившее в пос. Лиственничном на оз. Байкал 8—11 сентября 1964 г., в нашей стране достигнуты большие успехи в изучении биотического круговорота веществ в озерах и роли в нем микроорганизмов. Это позволило подойти к более точному балансовому выражению круговорота веществ.

Вопросам комплексного освоения водохранилищ было посвящено специальное научно-техническое совещание, состоявшееся в Киеве 24—26 июня 1965 г. На этом совещании были разработаны рекомендации, способствующие улучшению проектирования строительства и эксплуатации водохранилищ.

При комплексных исследованиях гидрологические работы наряду с самостоятельным значением способствуют решению ряда биологических, санитарно-технических, энергетических и других вопросов, связанных с использованием водных ресурсов. Результаты гидрологических исследований позволили расширить наши представления о водохранилище как о среде обитания водных организмов, выявить, насколько благоприятны в них условия существования для рыб, особенно промысловых, и наметить пути повышения рыбного промысла в этих водоемах.

В настоящее время изучением водохранилищ занимаются различные учреждения Гидрометеослужбы, Академии наук СССР и республиканские Академии наук, университеты и многие ведомственные институты, а также ряд проектных и строительных организаций. Исследования по санитарно-

техническому состоянию водохранилищ выполняются Академией медицинских наук и организациями Министерства здравоохранения СССР. Работы в области изучения качества воды с точки зрения ее использования для питьевого и промышленного водоснабжения ведутся Всесоюзным научно-исследовательским институтом (ВОДГЕО), Учинской лабораторией Мосводопровода и другими организациями.

Гидробиологические исследования на водохранилищах проводятся Институтом биологии внутренних вод АН СССР, Институтом гидробиологии АН УССР и университетами, а рыбохозяйственное изучение ведет в основном Институт озерного и речного рыбного хозяйства (ВНИОРХ).

В результате проведения обширных исследований советские ученые достигли определенных успехов в раскрытии закономерностей природных процессов, протекающих в водохранилищах, и в разработке расчетных методов, позволяющих с известным приближением прогнозировать гидрологический и гидробиологический режимы проектируемых водохранилищ, а также определять расчетным путем режимные характеристики отдельных неизученных естественных водоемов.

Работы В. К. Давыдова, С. И. Руденко, Б. Д. Зайкова, С. Н. Крицкого, М. Ф. Менкеля, К. И. Россинского, М. И. Будыко, А. П. Браславского и З. А. Викулиной значительно углубили и расширили наши представления о процессе испарения с водной поверхности и уточнили расчетную методику. Раскрытие закономерностей режима ветра и влажности при переходе с суши на водную поверхность и над водной поверхностью позволили прогнозировать будущий метеорологический режим вновь создаваемых водохранилищ.

Серьезные успехи достигнуты в изучении процессов волнообразования на водохранилищах и в определении параметров волны. В разработке теоретических основ процесса волнообразования на водоемах, ограниченных по протяжению и глубине, и выяснении механизма передачи волнам энергии ветра большую роль сыграли работы В. М. Макковеева, выразившего закономерности процесса в виде дифференциального уравнения баланса потока энергии и вытекающей из него формулы зависимости элементов волны глубокой воды от скорости ветра и величины разгона. Существенное значение для развития теории волнообразования на водохранилищах имели исследования В. В. Шулейкина, Л. Н. Сретенского, Л. П. Капицы и ряда других ученых. Вопросы трансформации ветровых волн на малых глубинах освещены в трудах Н. Е. Кондратьева, В. Г. Андреевым разработана соответствующая методика расчета.

Существенные достижения имеются в области исследования и расчета сгонно-нагонных явлений. Значительная роль в изучении этих явлений принадлежит А. В. Караушеву, разработавшему методику расчета сгонно-нагонных деnivelаций, ветровых течений и движения наносов в водоемах при наличии волнения. Им же разработаны упрощенные способы определения ветрового нагона. В основу данных работ была положена теория сгонно-нагонных колебаний уровня, разработанная В. М. Макковеевым. Успешному развитию исследований в этой области способствовали работы Н. А. Лабзовского и А. П. Браславского.

На основе трудов В. К. Давыдова, Б. Д. Зайкова, В. Г. Андреева, П. П. Кокоулина разработана методика исследований и расчета водного баланса водохранилищ, а благодаря работам К. И. Россинского и И. А. Кузьмина, А. А. Пивоварова, В. И. Рутковского выявлены основные закономерности термики и особенностей теплового баланса водохранилищ.

Значительные успехи достигнуты в исследовании переформирования берегов и формирования дна водохранилищ. Под руководством Н. Е. Кондратьева разработана методика расчета переформирования берегов под воздействием ветрового волнения, которая позволяет определять

формы устойчивого профиля береговой отмели, действия на берега отдельных штормов и серии штормов, а также составлять прогноз развития переформирования берега во времени. Большая роль в исследовании переформирования берегов водохранилищ принадлежит Г. С. Золотареву, А. В. Качугину, Б. А. Пыпкину, С. Л. Вендрову, Н. А. Лабзовскому, И. А. Печеркину. По расчетам заиления и формированию дна водохранилищ всеобщее признание получили работы Г. И. Шамова, Б. В. Полякова, М. А. Великанова, С. Г. Алтунина, Г. В. Лопатина.

Проводится изучение гидрогеологических и гидрологических процессов в зоне затопления иа мелководьях и в зоне подтопляемых земель. В этой области особого внимания заслуживают работы Г. Н. Каменского, Н. Н. Биндемана.

С созданием водохранилищ широко развернулись исследования гидрохимических характеристик и качества воды этих водоемов. В трудах Н. М. Бочкова, Я. Ф. Плешкова, П. П. Воронкова, Н. Г. Фесенко разработана методика прогноза минерализация воды водохранилищ, а исследованиями В. Г. Дацко, А. М. Алмазова, А. А. Зенина, Ю. М. Матарзина и других авторов выявлены особенности гидрохимического режима. В связи с проблемой качества воды водохранилищ особого внимания заслуживают работы С. М. Драчева и А. В. Францева.

Успехи советских ученых в раскрытии закономерностей природных процессов, протекающих в водохранилищах, получили международное признание. На Международном симпозиуме по гидрологии озер и водохранилищ, проходившем 9—15 октября 1966 г. в Италии, было отмечено совершенство методики исследований водохранилищ, оригинальность, новизна и высокий научный уровень советских работ (*Hydrologie des lacs et des reservoirs. Symposium de Garda, 9—15 octobre 1966, organisé dans le cadre de la Decennie hydrologique internationale avec l'aide de l'Unesco. Vol. I—II. Gentrugge, Belgique, 1966*).

Этот симпозиум показал, что в последние годы исследования водохранилищ широко ведутся и в ряде зарубежных стран. Особое внимание при этом обращается на изучение регулирующей способности этих водоемов (I. Vucetic, H. Riggs, P. Dubreuil, J. Bernier и др.) и на определение их емкости (G. Conoi, W. Meyer, M. Melentijevich).

Интересные данные получены по некоторым балансовым характеристикам ряда водохранилищ, в частности полужасушливой зоны северо-восточной Бразилии (P. Dubreuil). Недостаточно надежные и разновременные наблюдения не позволяют в настоящее время охарактеризовать все компоненты водного баланса этой слабоизученной части нашей планеты, но все же дают представление о величине испарения с водной поверхности водоемов в указанных районах.

При исследовании балансовых характеристик внутренних водоемов за рубежом широко используется современная вычислительная техника. В связи с этим заслуживают внимания работы американских исследователей по математическому моделированию притока и оттока воды из озера с помощью цифровой вычислительной машины (I. Jeng and V. Iedjevich), польских ученых — по изучению многолетних колебаний уровня Мазурских озер и зависимости уровня от атмосферных осадков (L. Mikulski), исследование спектральных свойств гидрологического режима и возможность их моделирования в качестве стохастического процесса (K. Naczazel).

Большое значение уделяется зарубежными авторами изучению испарения и разработке методических вопросов, связанных с исследованием процесса испарения (D. Richter, G. Rossi, J. Vasa), а также годовой изменчивости величины испарения (G. Harbeck), зависимости испарения от залесенности берегов и наличия растительности в водоеме.

В ряде работ показаны некоторые особенности термического режима водоемов замедленного водообмена в различных широтах и рассматривается методика изучения его с помощью аэрофотосъемки (I. Kutschke, S. Serguay, P. Vivier, G. Kodgers, T. Richards). Серьезное внимание уделяется изучению динамических явлений во внутренних водоемах (L. Muszkaluv, I. Iartsever и P. Malkki).

Значительный интерес представляют результаты исследований гидрохимического режима и изменений химических свойств воды при регулировании стока (C. Prophet, P. Olszewski, B. Jones, A. Van Denburgh), вопросы заиления и переформирования берегов (I. Cyberski, J. Roehl, E. Flakman, F. Hamvas, I. Carbonnel).

За год перед этим симпозиумом, в конце сентября—в начале октября 1965 г. в Лондоне состоялся форум ученых, на котором обсуждались вопросы, связанные с изучением искусственных озер (Man-made Lakes, 1966. Proceedings of a Symposium heldt at the Royal Geographical Society, London on 30 September and 1 October, 1965, Edited by R. H. Lowe—M. Connel Academic Press. London and New York).

Среди докладов симпозиума 11 было посвящено проблемам создания и эксплуатации водохранилищ в тропиках.

Большие площади открытой воды оказывают многостороннее влияние на природу окружающих областей. В тропических странах эти процессы протекают с особой интенсивностью. Так, новые искусственные водоемы в низменных областях Африки значительно расширили площади заболоченных земель, а это в свою очередь повлекло за собой увеличение числа заболеваний, переносчиками которых являются насекомые, быстро размножающиеся в заболоченных районах.

На большинстве водохранилищ Африки и Южной Америки бурно развивается водная растительность, создавая серьезные затруднения для водного транспорта и рыбного хозяйства, резко ухудшая санитарное состояние водоемов.

В ходе симпозиума рассматривались вопросы, связанные с продуктивностью водохранилищ, их созревании (R. Stroud). По данным американских биологов, наибольшие уловы рыбы отмечаются после стабилизации режима водохранилищ — в среднем через 50 лет после заполнения.

Особенности биологических процессов, протекающих в крупных тропических водоемах, стали предметом обсуждения на специальном симпозиуме в Аккре, который состоялся 21—24 ноября 1966 г. (H. B. Nuppes, 1967).

Все это свидетельствует о том, что на современном этапе развития человеческого общества существует настоятельная необходимость всестороннего изучения и поиска путей рационального использования природных ресурсов континентальных водоемов.

Материалы и методика

Данные, характеризующие гидрологические процессы в волжских водохранилищах, получены в результате стационарных и экспедиционных наблюдений. Первые из них собраны учреждениями Гидрометеослужбы и представляют собой систематические многолетние и эпизодические наблюдения над отдельными элементами гидрологического режима водохранилищ. Сбор их осуществляется по методике, определяемой соответствующими Наставлениями Гидрометеослужбы, и публикуются они в изданиях этой системы.

Экспедиционные наблюдения, использованные нами, представляют собой материалы комплексных экспедиций, маршрутных, скоростных и синхронных съемок, проводившихся в разные сезоны на различных

водохранилищах волжского каскада Институтом биологии внутренних вод АН СССР.

При значительной протяженности и большой площади отдельных водохранилищ комплексные экспедиции и маршрутные съемки продолжают от нескольких суток до двух недель и более. При неустойчивом режиме водохранилищ результаты наблюдений полученные в итоге таких обследований, оказываются мало сравнимыми и статистически неопределенными. Поэтому в настоящее время назрела настоятельная необходимость в организации более целенаправленного сбора материалов наблюдений, чем это делается в обычных комплексных рейсах. Как указывает Х. Стоммель (Stommel, 1963), при использовании несовершенных методов сбора материалов наблюдений упускаются наиболее существенные особенности физических процессов происходящих в море что тормозит развитие теоретических исследований.

Учитывая эти обстоятельства, в лаборатория гидрологии Института биологии внутренних вод АН СССР начиная с 1957 г. для получения данных по суточной динамике отдельных элементов режима в разных частях Рыбинского водохранилища стали проводить синхронные наблюдения с 4—5 судов, поставленных на якоря (Рутковский, 1958). Результаты подобных наблюдений позволили дать характеристику отдельным элементам режима и проследить за их суточным ходом при определенных условиях в одно и то же время на различных участках водоема. Однако для выявления особенностей режима и для характеристики распределения вод различного происхождения, поступающих в водохранилище, этих материалов оказалось недостаточно. Поэтому наблюдения стали дополняться данными скоростной съемки водохранилища, маршрут которой проходил вблизи суточных станций. Такая съемка проводилась с быстроходного судна, проходящего за сутки около 450 км, и маршрут ее через 24 часа повторялся (Рутковский, 1958).

Скоростные маршрутные съемки проводились также при изучении гидрологического режима и водных масс других волжских водохранилищ (Рутковский, 1963б; Эдельштейн, 1965а; Буторин и Курдина, 1968). Начиная с весны 1960 г. скоростные съемки на Рыбинском водохранилище были заменены синхронными наблюдениями определенной сетки станций, расположенных более или менее равномерно по всему водоему. Для проведения синхронных съемок Рыбинского водохранилища было укомплектовано четыре экспедиционных судна. С каждого судна во время съемки выполнялось на заданном маршруте от 15 до 17 станций. Все суда начинали работу одновременно и, имея примерно одинаковую скорость и соответствующим образом рассчитанный маршрут, заканчивали съемку примерно в одно и то же время. Между судами и берегом поддерживалась радиосвязь. Все это позволило время съемки водохранилища сократить до 12—14 часов, а полученные материалы наблюдений можно было считать синхронными.

В навигационный период общее число станций при синхронных съемках колебалось около 60. Местоположение их при первой съемке определялось засечками по береговым ориентирам. Станции наносились на карту и с карты снимались их координаты. Положение станций увязывалось с навигационной обстановкой водохранилища, что значительно облегчало нахождение их при последующих съемках. Время от времени местоположение отдельных станций проверялось повторным пеленгованием.

В зимний период наблюдения проводились с помощью машины ГАЗ-47. При этом количество станций заметно уменьшалось, а продолжительность съемок увеличивалась до 7—8 суток. Поскольку ледяной покров исключает непосредственное влияние метеорологических условий на водные

Табиғат

Методы снижения расхода сырья и энергии

[illegible]

Таблица 4 (продолж и)

Дата	Число станций	Число замеренных глубин	Число наблюдений над течением	Число наблюдений над волнением	Число наблюдений над температурой воды	Число наблюдений над температурой поверхности дна	Число наблюдений над прозрачностью	Число в птук проб в м	Число наблюдений ад ром тую выдух	Число наблюдений тем тую выдух
12 V 6 VIII 4 XI	64 67 55	64 67 55	— — —	64 50 43	411 381 234	33 50 34	62 67 44	185 183 172	6 67 55	6 17 35
1963										
30 I—6 II 18—20 IV 14 VI 3 VIII 3 IX	30 21 63 69 59	30 21 63 69 59	— — 17 — —	— — 48 63 49	269 150 336 445 319	27 21 — 38 39	— 58 78 56 25	68 48 261 197 170	59 69 59 47	60 69 3
21—23 XI 26 XII 1963—4 I 1964	47 27	47 27	— —	47 —	219 142	— 25	—	137 76		
1964										
25 II—3 III 11—15 IV 15 V 9 VI 1 VIII 3 XI	27 15 61 61 61 59	27 15 61 61 61 59	— — — — — —	— — 56 61 53 45	116 36 257 274 288 253	27 — 46 31 32 59	— 59 59 59 50	71 42 176 176 176 167	61 61 61 59 12 20	59 61 61 9 11 21
10—12 XI 18—20 XI	12 20	12 20	— —	12 20	113 187	7	14	38		
Всего	1532	1532	806	1079	7966	764	1102	4434	1176	1 51

массы водохранилища, то синхронность получения материалов наблюдений вимой не имеет такого значения, как в навигационный период.

Анализ материалов наблюдений показал, что для получения более полного представления о гидрологических процессах, протекающих в водохранилищах при определенных метеорологических условиях, наиболее целесообразным является метод синхронных съемок (Буторин, 1965в).

Для более полного представления о качестве материалов, на которых базируется исследование водных масс волжских водохранилищ, рассмотрим их отдельно по каждому водохранилищу.

Рыбинское водохранилище. За период с мая 1960 г. по ноябрь 1964 г. в водохранилище проведено 28 синхронных съемок, из них 20 — с экспедиционных судов и 8 — со льда. Общее число станций, выполненных при синхронных съемках, достигло 1532. О распределении их по сезонам отдельных лет можно судить по данным, представленным в табл. 4. Однако календарные сроки проведения синхронных съемок в отдельные годы не совпадают по причине их зависимости от условий водности года, по годам, а иногда и по техническим причинам. По этим же причинам число съемок, как и число станций, несколько менялось. Подавляющее большинство станций расположено в открытой части водохранилища. Менее освещены наблюдениями его речные участки.

Все синхронные съемки выполнялись одним составом наблюдателей по единой методике и однотипным оборудованием. Из года в год заданная сетка станций бралась, как правило, с одного и того же судна. На основании этого материалы синхронных съемок можно считать вполне надежными и качественными. Ценность таких материалов тем более значительна, что они равномерно освещают годовой ход элементов гидрологического режима.

Горьковское водохранилище. Основные материалы наблюдений для характеристики водных масс Горьковского водохранилища получены К. К. Эдельштейном методом скоростных маршрутных съемок. Всего за 1961—1963 гг. выполнена 21 съемка (табл. 5). Большая часть данных относится к озерной части водохранилища. Общее число станций при летальных съемках колебалось от 60 до 70, а при сокращенных равнялось 40. Всего выполнено около 1000 гидрологических станций. Для уточнения местоположения границ раздела водных масс, на отдельных разрезах (через 1—3 км), кроме того, проводилось определение температуры и электропроводности поверхностного слоя воды. Такие же материалы, помимо данных опорных комплексных гидрологических станций, собраны в речной части водохранилища ниже устьев наиболее крупных притоков, в районе влияния последних на воды водохранилища.

Кроме скоростных съемок в озерной части водохранилища выполнен ряд суточных станций, позволивших получить данные о суточном ходе величин отдельных показателей водных масс при различных условиях погоды.

При изучении динамики водных масс Горьковского водохранилища использованы также материалы эпизодических маршрутных скоростных съемок водоема (Рутковский, 1963б; Буторин и Курдина, 1968). О количестве разрезов и станций, выполненных в процессе этих съемок, можно судить по данным табл. 6. Подобные материалы собраны также на Куйбышевском (табл. 7), Ивановском и Угличском водохранилищах (табл. 8).

Из представленных материалов видно, что отдельные водохранилища освещены данными экспедиционных наблюдений неравномерно. В наибольшей степени изучено Рыбинское водохранилище; только по данным синхронных съемок в нем выполнено несколько десятков тысяч опре-

Таблица 5

• Материалы скоростных съемок Горьковского водохранилища
(по К. К. Эдельштейну, 1968)

Дата	Речная часть		Озерная часть			Польские заливы	
	количество станций	количество поперечных разрезов	количество реопроводов	количество станций	количество поперечных разрезов	количество станций	количество поперечных разрезов
1961							
18 VI — 5 VII	12			35	9	28	6
8 VII — 11 VII	14			11			
23 VII — 28 VII	30	7		41	9		
29 VII — 1 VIII	19			9			
1962							
15 VI — 23 VI	8	1	1	37	8	18	6
28 VI — 30 VI	5	1		32	7	1	
17 VII — 27 VII	6	1	1	26	5	23	8
31 VII — 1 VIII	3	1	1	36	8	5	1
28 VIII — 7 IX	6	23	1	35	8	29	9
10 IX — 14 IX	6	18	1	36	8	2	
17 X — 26 X	8	4	1	36	8	25	9
28 X — 30 X	4	—	—	36	8	2	—
1963							
2 II — 15 II	4	—	—	15	3	19	
27 III — 4 IV	6		—	17	4	19	—
24 IV — 3 V	—	—	1	22	5		
15 V — 22 V	4	12	1	37	10	22	8
23 V — 24 V	—	—		36	8		
26 V — 30 V	6	10	1	12	3	2	
27 VI — 5 VII	4	24	1	40	9	26	10
7 VII — 8 VII	—	—	—	39	9	2	
9 VII — 12 VII	6	20	1	15	5	5	—
Всего	151	122	11	603	134	228	57

Таблица 6

Материалы эвизодических скоростных съемок
Горьковского водохранилища

Дата	Число поперечных разрезов	Число станций	Число наблюдений над температурой воды	Число наблюдений над электропроводностью
22—23 VI 1960	6	26	208	198
10—11 VIII 1962	—		63	63
20—21 VIII 1962	3	13	129	129
21 VIII—3 IX 1963	—	17	67	65
10—21 IX 1965	3	—	136	130
1—10 VII 1966	—	—	70	69
Всего	12	56	673	654

Т а б л и ц а 7

**Материалы эпизодических скоростных съемок
Куйбышевского водохранилища**

Дата	Число поперечных разрезов	Число станций	Число наблюдений над температурой воды	Число наблюдений над электропроводностью
24—27 VI 1960	16	78	470	386
11—12 VIII 1962	—	—	111	111
16—20 VIII 1962	8	33	297	297
21 VIII—3 IX 1963	—	19	118	118
10—21 IX 1965	9	34	390	396
1—10 VII 1966	—	—	140	141
Всего . .	33	164	1526	1449

делений различных характеристик режима. Значительный объем материалов экспедиционных наблюдений имеется и по Горьковскому водохранилищу. Помимо данных скоростных съемок, мы располагаем большим количеством определений различных характеристик режима в период его становления.

Значительно слабее освещены такими наблюдениями Куйбышевское и особенно Волгоградское водохранилища. В этих водоемах исследование

Т а б л и ц а 8

**Материалы эпизодических скоростных съемок Иваньковского
и Угличского водохранилищ**

Дата	Число поперечных разрезов	Число станций	Число наблюдений над температурой воды	Число наблюдений над электропроводностью
13—16 VI 1961	22	82	771	390
8—12 VIII 1966	8	39	433	449
9—11 II 1967	5	26	197	130
10—16 III 1967	11	45	273	13
3—6 V 1967	11	58	465	450
29 V—3 VI 1967	7	62	436	430
26 VI—1 VII 1967	6	66	447	440
Всего	70	378	3022	2302

водных масс носило эпизодический характер. Это относится также к Иваньковскому и Угличскому водохранилищам.

Для характеристики гидрологических процессов, и в частности динамики водных масс в водохранилищах волжского каскада, помимо материалов синхронных и скоростных съемок, выполнявшихся по специально разработанным схемам, использованы также данные комплексных экспедиций и эпизодических наблюдений над отдельными характеристиками гидрологического режима за 1954—1967 гг. и литературные источники.

Исследование гидрологических процессов в водохранилищах волжского каскада осуществлялось в основном обычными приборами, рекомендуемыми в Руководствах и Наставлениях Гидрометеослужбы. Однако своеобразие гидрологического режима водохранилищ заставило нас, с одной стороны, в некоторых случаях отклониться от общепринятой

методики измерения некоторых показателей режима и внести некоторые конструктивные изменения в существующие приборы и даже создать новые, а с другой — использовать приборы и методы исследований смежных отраслей науки, и прежде всего океанологии.

В процессе изучения температурного режима приходилось корректировать методику исследования. Так, работа с опрокидывающимися глубоководными термометрами на водохранилищах, особенно на мелководных участках, весьма затруднительна. Кроме того, изучение биологических процессов, протекающих в водохранилищах, потребовало измерения температуры в придонном слое воды непосредственно над грунтом и даже в донных отложениях. Обыкновенные ртутные термометры для этой цели оказались непригодными. Пришлось разработать конструкцию электротермометра с полупроводниковым датчиком. Небольшие размеры датчика, позволяющие измерить температуру непосредственно в точке наблюдений, возможность дистанционного определения ее, малая инерционность и прочность конструкции — эти ценные качества позволили широко применять прибор при изучении температурного режима водохранилищ. По принципу электротермометра был сконструирован прибор для измерения температуры в грунтах водохранилищ (Бакастов, 1963). Применение обоих приборов позволило получить многочисленные данные по температуре воды и донным отложениям водохранилищ.

Впоследствии электротермометр был использован в специальном приборе, сконструированном для одновременного измерения температуры и электропроводности воды. Обычно измерение электропроводности производилось при помощи стандартной ячейки Х-38 в комплекте с реохордным мостом Р-38. Стандартная ячейка имеет емкость 50 см³. Заключенные в ней электроды из платины покрыты платиновой чернью. Такой ячейкой пользовались при определении электропроводности в лаборатории и в экспедиционных условиях. Как показали исследования М. Г. Ершовой и К. К. Эдельштейна (1964), при использовании ячейки в экспедиционных условиях точность измерения электропроводности уменьшается. В связи с этим применять ее желательно в лабораторных условиях, тем более что при хранении проб в течение 7—10 суток электропроводность воды практически не меняется.

Для измерения температуры и электропроводности в экспедиционных условиях широко использовался термокаппаметр (Эдельштейн, 1963б). Электродами в этом приборе, как и в стандартной ячейке, являются платиновые пластинки, приемником служит мост Р-38 с питанием от аккумуляторов через преобразователь ОП-120. В качестве датчика температуры используется полупроводниковое термосопротивление ММТ-4. Его сопротивление измеряется мостом МВУ-49 или МО-62. По величине сопротивления при помощи тарифовочной таблицы вычисляется температура воды с точностью до 0.1°.

Зимой в полевых условиях для измерения температуры и электропроводности воды использовалась несколько иная модель прибора. Питание прибора осуществлялось от сухого элемента КБС-Л-0.50 через поляризованное реле РП-7, которое служило в качестве зуммера, а вместо гальванометра в схему включался низкоомный телефон. Равновесие моста Р-38 в данном случае определялось по минимуму звука в наушниках. Вследствие понижения точности определения электропроводности, возникшего за счет замены гальванометра телефоном, в ряде случаев для контроля электропроводности определялась в лаборатории стандартной ячейкой.

Одновременно с решением методических вопросов при изучении температурного режима водохранилищ осваивалась методика определения теплофизических коэффициентов в грунтах (Бакастов, 1965).

При изучении скоростного режима удалось установить, что наиболее перспективными приборами для измерения течений в водохранилищах являются самописцы течений, используемые в океанологических исследованиях (Буторин и Эдельштейн, 1961; Буторин и Литвинов, 1962). Для использования самописцев течений в своеобразных условиях водохранилищ разработана методика установки их на буйковых станциях и жесткой основе (Литвинов, 1965).

Особый интерес представляет измерение малых скоростей течения. В связи с этим заслуживает внимания попытка измерения скоростей течения в Рыбинском водохранилище с помощью термогидрометра (Эдельштейн, 1963а).

Для измерения ветровых течений в водохранилищах использовались двойные привязные поплавки и поплавки-паруса (Эдельштейн, 1963б; Литвинов, 1966).

Наряду с океанологическими методами выделения водных масс разработана методика выделения их с помощью электронно-вычислительной машины (Буторин, Смирнов, 1968).

Все гидрохимические определения велись по стандартным методам, применяемым при исследовании химических свойств вод суши (Алекин, 1948).

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА

Глава I

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВОДОХРАНИЛИЩАХ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА

**Краткая физико-географическая характеристика
водосбора волжских водохранилищ**

Территория района исследований занимает значительную часть бассейна Волги. С учетом таких крупных притоков, как Кама и Ока, она простирается от 48°42' до 61°29' с. ш. и от 32°32' до 60°10' в. д. Поскольку ход гидрологических процессов в континентальных водоемах в большей степени определяется физико-географическими условиями и геоморфологией их бассейнов, остановимся кратко на характеристике рельефа, геологического строения, климата и почвенно-растительного покрова бассейна Волги в районе рассматриваемых водохранилищ.

Рельеф волжского бассейна в общем может быть охарактеризован как равнинный. Однообразие его нарушается лишь сравнительно невысокими поднятиями, незначительными по площади и одиночно расположенными. Наиболее характерной особенностью рельефа является резко выраженная асимметрия речных долин. Это четко прослеживается на примере самой Волги. На значительном протяжении рассматриваемого района она имеет крутой и высокий правый берег и сравнительно низкий и пологий левый берег. Северная часть исследуемого района, представляющая собой бассейн Рыбинского водохранилища, расположена на западе Средне-Русской равнины. Значительная территория ее — низменное плато, а наиболее существенным понижением является Молого-Шекснинская низина. На юге эта низина почти полностью занята Рыбинским водохранилищем. Рельеф данного участка в основных чертах сформирован в доледниковое время. К настоящему времени ледниковый рельеф значительно переработан эрозионными и склоновыми процессами. В основном преобладает плоскохолмистый и мелкохолмистый рельеф вторичной моренной равнины. Почти для всей равнины в пределах рассматриваемого района характерны плоская заболоченная поверхность и слабое эрозионное расчленение. Отдельные понижения равнины заняты озерами, многие из которых сильно заросли. Иногда группы мелких озер располагаются среди обширных болотных массивов. Подобные формы рельефа характерны и для восточной части водосбора Верхней Волги, в пределах которой расположено Горьковское водохранилище.

Большим разнообразием форм рельефа характеризуется южная часть бассейна Волги, особенно на участке от г. Куйбышева до г. Камышина. Здесь на правобережье преобладает ложбинно-балочный и овражно-балочный рельеф при значительных площадях мелкоовражного рельефа, а на левобережье встречаются большие участки как равнинного рельефа, так и ложбинно-балочного и глубоко эрозионного с узкими водоразделами. Эти особенности рельефа определяют и гидрографическую сеть: правые

притоки Волги на этом участке или ничтожны, или отсутствуют, тогда как речная сеть левого берега насчитывает ряд довольно больших притоков.

На большей части бассейна Верхней и Средней Волги коренные породы пермского, триасового, юрского и мелового периодов, представленные в основном песчано-глинистыми отложениями, перекрыты сверху мощным чехлом ледниковых отложений. Только в восточной части бассейна встречаются выходы на поверхность пермских глин. Ледниковые отложения, являющиеся моренами днепровской и московской стадий оледенения, в виде валунных суглинков чередуются со слоями межморенных флювиогляциальных песков.

Значительно разнообразнее геологическое строение бассейна Волги в районе г. Куйбышева и южнее его. Древнейшими осадками правобережья Волги от Сызрани до устья р. Терешки и водосбора последней являются верхнеюрские отложения, представленные глинами и песками. Значительное распространение здесь имеют и верхнемеловые отложения, занимающие междуречья. В районе Камышина наблюдаются выходы верхнемеловых отложений и большие скопления песков, палеогеновых, флювиогляциальных и древнеаллювиальных. Здесь большую роль играют делювиальные отложения, представленные суглинками и изолирующие коренные породы от атмосферных воздействий. Для левобережья Волги характерно почти полное отсутствие пород моложе пермских. Встречающиеся пятна юрских и третичных отложений приурочены к дислоцированным участкам. Большое развитие имеют послетретичные породы, покрывающие территорию в виде толщ древнего аллювия, или так называемых сыртовых глин. Спокойный характер рельефа в пределах исследуемого района бассейна Волги способствует сравнительно плавному и постепенному изменению климатических условий.

Северная часть бассейна Волги характеризуется умеренно холодной многоснежной зимой и сравнительно теплым летом. Средняя многолетняя температура воздуха колеблется от 2.4° на северо-востоке рассматриваемой территории до 3.8° на юго-западе. Четко прослеживается понижение температуры воздуха с запада на восток. Так, если средняя многолетняя температура воздуха в Ярославле 3.5° , то в г. Солигаличе она только 1.8° . Как правило, среднемесячные температуры воздуха с ноября по март имеют отрицательные значения, а с апреля по октябрь — положительные.

Величина годового испарения, по П. С. Кузину (1950), составляет 300—400 мм, что приблизительно в 1.5 раза меньше суммы годовых осадков. Это приводит к тому, что вся территория бассейна Верхней и Средней Волги характеризуется избыточным увлажнением. Среднегодовое значение абсолютной влажности возрастает по направлению с северо-востока на юго-запад. Максимальное значение наблюдается в июне, а минимальное — в январе. Относительная влажность воздуха составляет в среднем около 80% и мало меняется на территории бассейна Верхней Волги. Наибольшая облачность наблюдается осенью и зимой, наименьшая — весной и летом.

Таким образом, несмотря на обширность территории бассейна Верхней Волги, значительную протяженность ее с севера на юг и с запада на восток, существенных различий в климатических характеристиках отдельных участков этого района не наблюдается.

Характерной особенностью климатических условий южного участка является континентальность, сухость теплого периода и суховеи. По значениям средней многолетней температуры воздуха этот район мало отличается от вышерасположенного. Так, средняя многолетняя температура воздуха в г. Чебоксары равна 2.7 , а в г. Куйбышеве — 3.8° .

Среднемесячные температуры воздуха в течение лета весьма устойчивы: в г. Тетюши в июне — 17.1° , в июле — 17.8 , а августе — 16.8°

(Боровкова и др., 1962). В отличие от северной части бассейна Волги здесь еще в первой половине сентября сохраняются летние температуры. Летом выпадает наибольшее количество осадков. В районе Куибышевского водохранилища оно колеблется от 30 до 120 мм в месяц. Облачность в этом сезоне невысокая. Преобладает в основном кучевая форма облаков. Зима умеренно холодная, с постоянным снежным покровом и частыми метелями. В зимний период много пасмурных дней. Число их увеличивается при вторжении морских воздушных масс. Эти вторжения приводят к повышению температуры воздуха, обуславливают пасмурную погоду и иногда сопровождаются морозящим дождем. Несмотря на это, зимой осадков выпадает меньше, чем в остальное время года.

Особенности климатических условий оказывают значительное влияние на растительный и почвенный покров. В северной части волжского бассейна преобладают дерново подзолистые почвы различного механического состава. Почвообразующими породами служат покровные пылеватые суглинки, опесчаненные моренные суглинки, флювиогляциальные и древнеаллювиальные пески. В бассейне Рыбинского водохранилища дерново-подзолистые почвы сочетаются с заболоченными дерново-подзолисто-глеевыми и болотными. Аналогичен состав почв и в районе Горьковского водохранилища. Так, для Галичско-Чухломской возвышенности характерны глинистые и тяжелосуглинистые почвы. В бассейне р. Унжи наибольшее распространение имеют суглинистые и супесчаные почвы, а в Ростовской и Ярославско-Костромской низинах распространены аллювиальные почвы (Великанов, 1958). В бассейнах рек Желваты, Немды и среднего течения Ней довольно часто пятнами встречаются дерново-подзолисто-глеевые, торфяно-подзолисто-глеевые и торфяные почвы.

Характер почв определяет и растительный покров. Северная часть рассматриваемой территории относится к подзоне южной тайги, а южная занята смешанными лесами. Леса распределены неравномерно, но залесенность отдельных участков бассейна Верхней Волги весьма высокая. Так, залесенность бассейнов Унжи с Неей и Костромы составляет 60—86% (Альбом гидрографических характеристик речных бассейнов в Европейской территории СССР, 1955). В среднем лесистость подзоны южной тайги выше, чем лесистость подзоны смешанных лесов. Преобладающими породами являются ель и береза. Сосновые боры разного качества обычно протягиваются вдоль рек и растут на песчаных и супесчаных почвах. На юго-запад от Рыбинского водохранилища облесенность территории постепенно уменьшается. Здесь встречаются в основном смешанные елово-сосновые леса, которые постепенно переходят в елово-березовые.

Если истоки Волги и часть ее бассейна, включая Рыбинское и Горьковское водохранилища, находятся в основном в зоне южной тайги, где преобладают подзолистые почвы и хвойные леса, то южнее, в зоне более умеренного климата, преобладают лиственные леса, которые постепенно переходят в лесостепь. Соответственно изменяется и почвенный покров.

В бассейне Волги между устьями Оки и Камы проходят северные границы ареалов ряда степных элементов, восточные границы ареалов некоторых средне-европейских видов и западные границы ареалов таежных сибирских видов. Это определяет весьма пестрый и сложный состав флоры данного участка бассейна. В северной его части преобладают елово-пихтовые леса, приуроченные к подзолистым почвам. Южная граница этих лесов не доходит до берегов Камы, но отдельные пятна встречаются и в районах, примыкающих к этой реке. По мере продвижения на юг елово-пихтовые леса сменяются еловыми, в которых встречаются южные формы широколиственных лесов. Еловые леса не вполне однородны: среди них встречаются и сосновые группы. Чисто сосновые леса имеют наибольшее распространение в приволжской полосе на песчаных подзолистых почвах.

К этим же почвам приурочены сосново-березовые леса, тогда как сосново-дубовые развиты в местах, где тонкий слой песка подстиляется более глинистыми породами.

В южной части рассматриваемого района хвойные леса сменяются дубовыми, а подзолистые почвы — серыми лесными почвами и черноземами. Сильно подзолистые почвы под дубовыми лесами встречаются редко. Дубовые леса постепенно наступают на степь. В этих краях различают кустарниковую и луговую степь. Для кустарниковой степи характерно развитие более или менее густых зарослей невысоких кустарников, а для луговой — преимущественное развитие разнотравья с подчиненной ролью злаков.

Наряду с особенностями в рельефе, геологическом строении, климатических условиях, почвенном и растительном покрове наблюдаются заметные различия и в гидрографии отдельных участков бассейна Волги. Не останавливаясь подробно на характеристике водных объектов, приведем лишь некоторые общие данные по главнейшим из них. Поскольку наполнение и питание водохранилищ происходит главным образом за счет рек, основное внимание уделяется рекам. Характеристика других водных объектов приводится более кратко, что отчасти объясняется меньшей изученностью их по сравнению с реками.

Характер рельефа и избыточное увлажнение определили хорошо развитую речную сеть Верхней Волги: ее густота колеблется от 0.15 до 0.36 км/км² (Давыдов, 1955). Это целиком относится и к бассейну Рыбинского водохранилища. Основной рекой бассейна данного водоема является Волга с ее многочисленными притоками. Наиболее крупные из них Молога и Шексна. Значительная приустьевая часть последних в настоящее время входит в пределы Рыбинского водохранилища. Кроме Мологи и Шексны на территории бассейна насчитывается 35 относительно крупных рек с площадью водосбора свыше 1000 км² (табл. 9) и несколько десятков более мелких рек и речушек.

Реки бассейна Верхней Волги характеризуются относительно слабым развитием долин и в северо-западной части бассейна водохранилища текут в беспойменных или узкопойменных долинах с расширениями на месте бывших озер. Более крупные долины с широкими пойменными террасами в западной части бассейна характерны лишь для повышенной равнины, примыкающей с востока к Валдайской возвышенности. В этом районе долины рек обычно сравнительно глубоко врезаны, имеют пойменные, а некоторые крупные и средние реки и надпойменные террасы.

В пределах Верхне-Волжской и Молого-Шекснинской низин долины рек выражены в рельефе слабо и, как правило, сливаются с плоскими пространствами болот и заболоченных лесов. Болота имеются в верховьях Волги и Мологи. Значительно больше их в бассейне Чагоды, но особенно много на водосборе Шексны и ее притоков. Здесь озера и болота образуют довольно емкую систему, регулирующую сток этих рек.

Залесенность бассейна Рыбинского водохранилища также весьма различна. Меньше других участков залесен бассейн Волги. Лишь в ее верховьях лес покрывает около 63% площади. На остальной части водосбора Волги и по ее притокам им занято от 30 до 50%. На Мологе лесом покрыто 37—48% площади водосбора и только на ее притоках Кобоже и Чагодоце — до 60%. Больше других залесен бассейн Шексны: выше г. Череповца лесом занято 58% площади водосбора, а в бассейне Суды — от 57 до 67% (Альбом гидрографических характеристик, 1955).

Русла большинства рек извилисты и имеют небольшой уклон, вследствие чего скорости течения в них невелики.

Основная роль в питании рек бассейна принадлежит снеговому покрову. По М. И. Львовичу (1938), Волга до Ярославля относится именно к такому

**Некоторые характеристики основных рек бассейна
Рыбинского водохранилища (от истока до указанного пункта)**

Р е к а	П у н к т	Д л и н а к м	П и т а н и е водоохран ной	Л е ж а щ и й б а с с е й н а	С р е д н и й м о д у л ь м н о г о л е т н и й м о д у л ь с т о к а, л / с е к
Волга	Г. Старица	393	21100	36.0	7.6
Селижаровка	Дер. Яровинка	16	2300		8.6
Вазуза	Дер. Золотилово	129	5360		
Касня	Сел. Субботники	79	1110		—
Гжать	Дер. Шакуты	72	1830	—	
Тьма	Сел. Новинки		1870	—	—
Тверца	Сел. Медное	148	5400	36.0	10.2
Осуга	До устья	158	2410		—
Шоша	Сел. Микулино городище	167	1320		—
Лама	Сел. Егорье	102	1340		—
Дубна	Сел. Зятково	140	2640	45.0	—
Сестра	До устья	132	3040	—	—
Яхрома	» »	101	1270	—	—
Медведица	Сел. Семеновское	233	5250	33.0	—
Нерль	Сел. Нерль	75	2790	32.0	—
Корочейна	Дер. Сумы	99	1570	—	—
Могоча	Дер. Борисоглеб	64	1340	—	—
Мелеча	До устья	85	1250	—	—
Осень	» »	7	3290	—	—
Молога	г. Устюжна	367	19100	45.0	6.0
Волчина	Волчинское лесничество	126	2990	—	—
Кобожя	Дер. Мощеник	124	2460	58.0	6.3
Чагодоца	Дер. Мегрино	130	7080	60.0	—
Лидь	Сел. Тургош	82	1330		9.2
Песъ	Дер. Пильно	136	1760	52.0	—
Суда	Дер. Куракино	120	4950	65.0	8.2
Колпь	Дер. Верхний Двор	202	3360	60.0	7.8
Андога	Хутор Ольховец	99	2080	57.0	7.3
Шексна	Дер. Черная Гряда	420	18400	58.0	9.4
Кунось	До устья	24	1130	—	—
Ковжа	Сел. Ковжа	84	5170	—	—
Шола	Дер. Королево	52	2280	—	—
Кема	Дер. Левково	87	4160	—	—
Индоманка	До устья	96	1670		—
Согожа	Г. Пошехонье-Володарск	126	3460	47.0	—

типу рек, но вместе с тем существенное значение в ее питании имеют также грунтовые воды и дожди, причем второе уступает первому. В процентах годового стока снеговое питание Волги у Ярославля составляет 53%, грунтовое — 30 и дождевое — 17% (Давыдов, 1953).

Некоторые характеристики стока рек бассейна Рыбинского водохранилища представлены в табл. 10. Из данных таблицы видно, что средний годовой модуль стока крупных рек бассейна колеблется от 5.9 до 10.2 л/сек. · км². Изменение его по территории бассейна связано с особенностями физико-географических условий и прежде всего с характером рельефа. На северо-западе и западе бассейна, в районах холмистого моренного ландшафта модуль стока заметно выше, чем в низменных заболоченных районах на юго-востоке. Однако в заболоченных и залесенных бассейнах Чагодоци, Суды и Шексны модуль стока такой же, как на северо-западе бассейна, а местами достигает 10—12 л сек. · км².

Некоторые характеристики годового стока рек бассейна Рыбинского водохранилища (от истока до указанного пункта)

Река	Пункт	Период наблюдений	Площадь водосбора, км²	Средние за период наблюдений			
				расход, м³/сек.	максимальный расход, м сск.	минимальный расход, м³ сек.	
						летний	зимний
Волга	Г. Старица	1891—1955	21100	7.6	2110	44.8	34.6
Селижаровка	Дер. Яровинка	1931—1955	2300	8.6	40.1	12.2	10.7
Тверца	Сел. Медное	1938—1955	5400	10.2	590	18.3	20.6
Сить	Дер. Родионово	1937—1955	990	5.9	128	0.22	0.17
Молога	Г. Устюжна	1934—1955	19400	6.0	1050	24.1	23.9
Кобожа	Дер. Мошеник	1934—1955	2460	6.3	174	2.79	2.70
Чагодоща	Дер. Анисимово	1934—1955	2720	—	117	6.69	11.5
Суда	Дер. Куракино	1935—1955	4950	8.2	336	15.8	16.3
Шексна	Дер. Черная Гряда	1938—1955	18400	—	595	110	

Т а б л и ц а 11

Сезонное распределение стока некоторых рек бассейна Рыбинского водохранилища (в процентах от годового стока)

Река	Пункт	Период наблюдений	Площадь водосбора, км²	Весна		Лето		Осень		Зима	
				III—V		VI—VIII		IX XI		XII II	
Волга	Г. Старица	1891—1955	21100	51		18		21		10	
Селижаровка	Дер. Яровинка	1931—1955	2300	32		24		24		20	
Тверца	Сел. Медное	1938—1955	5400	46		20		21		13	
Сить	Дер. Родионово	1937—1955	990	79		6		12		3	
Молога	Г. Устюжна	1934—1955	19400	60		15		16		9	
Кобожа	Дер. Маценик	1934—1955	2460	58		17		17		8	
Чагодоща	Дер. Анисимово	1958—1955	2720	51		15		22		12	
Суда	Дер. Куракино	1935—1955	4950	47		22		20		11	
Шексна	Дер. Черная Гряда	1958	18400	28		30		24		18	

По характеру водного режима реки бассейна Рыбинского водохранилища относятся к восточноевропейскому типу. Внутригодовое распределение стока в них весьма неравномерно (табл. 11). Подъем уровня рек начинается при переходе температур воздуха к положительным значениям и на отдельных реках достигает 7—8 м. У большинства крупных рек бассейна весенний сток составляет свыше 50⁰ от годового, а у некоторых, например у р. Сить, он достигает 79⁰.

Интенсивное половодье в ряде случаев вызывает затопление обширных пойменных участков. В зависимости от строения долины и высоты берегов ширина разливов на малых реках может достигать 100 м, а на средних реках — до 400 м. Особенно велик весенний разлив в долинах рек Шоши и Медведицы, где он колеблется от 2 до 2.5 км. Освобождение пойменных участков от воды половодья происходит обычно в конце апреля—начале мая.

Сток летнего и осеннего периодов почти одинаков, хотя осенний обычно на 3—4% выше летнего. Зимний сток рек бассейна имеет минимальные по сравнению с другими сезонами значения, редко превышает 10⁰ от годового. Исключение в этом отношении представляет лишь р. Шексна. Поскольку ее сток регулируется Белым озером, то сезонное распределение его более равномерно. Так, в 1958 г. зимний сток Шексны был лишь на 10⁰ меньше весеннего, а последний на 2⁰ меньше летнего.

Сезонное распределение стока связано с характером питания рек в течение года. Если весеннее половодье обусловливается таянием снега на территории бассейна, а увеличение стока осенью вызывается дождевыми паводками, которые наблюдаются почти ежегодно, то формирование минимального стока летней и зимней межени происходит за счет дренирования верхних и глубоких горизонтов подземных вод. В связи с этим одна и та же река в разные сезоны несет не только различное количество воды, но и воду различного химического состава. Неоднородность химического состава речных вод, формирующихся в отдельных районах бассейна Рыбинского водохранилища, хорошо показана на примере Волги, Мологи и Шексны О. А. Алекиным (1948) и А. П. Щербаковым (1950).

В бассейне Рыбинского водохранилища имеется значительное количество озер, которые входят в озерную область пояса моренных отложений, связанных своим происхождением с гляциальной и флювиогляциальной аккумуляцией (Давыдов, 1953). Большинство озер имеют незначительные размеры. Наиболее крупные из них Белое и Селигер (табл. 12). Форма озер весьма разнообразна и определяется в основном их происхождением.

Озера, возникшие в долинах древних ледниковых потоков, имеют продолговатую форму и располагаются иногда цепочками (например,

Т а б л и ц а 12

Некоторые морфометрические данные по озерам
бассейна Рыбинского водохранилища

Озеро	Площадь зеркала, км²	Средняя глубина, м	Максималь- ная глубина, м
Белое	1130.0	—	—
Селигер	208.0	5.8	24
Плещеево	50.8	—	25
Веслуг	30.4	7.4	14
Сиг	27.3	6.2	10
Лиглино	23.0	—	15
Великое	18.0	—	15
Стерж	17.9	—	—
Пено	15.6	—	6

Верхневолжские озера). Озера, расположенные в углублениях среди моренных холмов, имеют сложные очертания берегов. Они отличаются неровным рельефом дна и значительными глубинами. Примером такого типа озер является озеро Селигер. Кроме указанных в табл. 12 озер, на территории бассейна водохранилища встречается большое количество мелких озер самой различной формы. Многие из них находятся в стадии зарастания и заболачивания.

Глубины озер весьма разнообразны. Более глубокие озера заполнены относительно чистой, прозрачной водой, а озера мелководные, в большинстве случаев окруженные болотами, обычно имеют мало прозрачную воду с большим содержанием гуминовых веществ.

Гидрологический режим озер бассейна изучен очень слабо. Некоторые общие положения известны лишь относительно термике озер. Для температурного режима озер летом характерна прямая стратификация, весной и осенью — гомотермия, а зимой обычно наблюдается обратная стратификация. Все озера бассейна зимой покрываются льдом.

Основными источниками питания озер бассейна являются поверхностный сток и атмосферные осадки. Большая часть озер расположена в истоках рек, а некоторые входят в состав озерно-речных систем и оказывают регулирующее влияние на режим этих рек. Отсюда видно, что озера бассейна оказывают существенное влияние на формирование и сезонное распределение стока рек, а следовательно, и на формирование водных масс водохранилищ.

В результате регулирования стока рек бассейна Верхней Волги на территории этого бассейна возник ряд водохранилищ. Общая площадь их водного зеркала составит 6982 км², а полный объем—35.18 км³. Образование водохранилищ существенно изменило не только гидрологический режим рек, но и ландшафт территории, примыкающей к ним.

Хорошо развита речная сеть и в бассейне Горьковского водохранилища, хотя густота ее в различных частях бассейна неодинакова. Наибольшей густотой речной сети отличаются водосборы Костромы и верховий Унжи, а наименьшей — правобережная часть бассейна водохранилища. Крупнейшими притоками Волги на участке Горьковского водохранилища как раз и являются Унга и Кострома. Основные гидрографические характеристики рек бассейна Горьковского водохранилища, имеющих водосбор более 1000 км², приведены в табл. 13.

Реки бассейна водохранилища имеют преимущественно снеговое питание. По характеру водного режима они относятся к восточноевропейскому типу с высоким весенним половодьем и умеренно низкой меженью, нарушаемой в летне-осенний период дождевыми паводками. Весенний подъем уровня начинается на юге бассейна в конце марта, а на севере — в начале апреля. Средняя дата весеннего максимума стока большинства рек приходится на вторую половину апреля. Максимальные модули стока половодья достигают 100—250 л/сек.·км². Весенний сток рек бассейна составляет в среднем 60—65% годового объема стока.

Величина среднего многолетнего модуля стока в бассейне водохранилища возрастает по направлению с юга на север с 6.0 до 9.0 л/сек.·км². В многоводные годы среднегодовые модули стока достигают 16—17 л/сек.·км², а в маловодные понижаются до 1.5—4.5 л/сек.·км². Изменчивость годового стока рек бассейна, по данным К. П. Воскресенского (1962), характеризуется значениями C_v от 0.26 до 0.32.

Число озер в бассейне водохранилища невелико. Среди них наиболее крупными по площади выделяются три озера: Неро (52.3 км²), расположенное в истоке Которосли, Галичское (75.4 км²) и Чухломское (48.7 км²) в бассейне Костромы. Остальные озера представляют собой водоемы

Т а б л и ц а 13

Некоторые характеристики основных рек бассейна Горьковского водохранилища

Река	Длина, км	Площадь бассейна, км	Замыкающий створ ГМС	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км	Среднегодовой расход, м сек.
Которосль	110	6012	Гаврилов-Ям	79	4860	39.3
Устье	114	2530	Дуброво	30	1530	11.4
Солоница	103	1520	Бортниково	62	708	5.55
Косгрома	358	17100	Буй	124	8870	69.7
Векса Чухломская	44	1400	—	—	—	—
Монза	96	1240	—	—	—	—
Векса Галичская	87	2800	Махрово	27	2690	20.3
Тебза	144	1120	Борок	36	968	10.0
Обнора	160	2445	Шарна	23	1750	13.8
Межа	133	1045	Ямково	23	887	7.44
Соть	152	1744	Верхний Жар	61	700	6.51
Мера	160	2420	Мало-Березово	66	820	7.03
Желвата	85	1230	Кельи	26	375	2.73
Немда	159	4860	Селище	65	3710	29.6
Шуя	166	1595	Пасьма	26	1470	11.1
Унжа	468	27360	Макарьев	70	18500	158.0
Вига	163	3360	Мартаново	43	1780	19.7
Ида	104	1040	—	—	—	—
Межа	180	2630	Загатино	39	2120	21.9
Нея	242	6060	Буслаево	40	5700	45.4
Нельша	110	1980	Сурипино	22	1890	18.6
Белый Лух	119	1490	Тимошино	84	464	3.49

с площадью зеркала менее 2 км². Они располагаются преимущественно в Ростовской и Ярославско-Костромской низинах.

Основными реками, питающими Куйбышевское водохранилище, являются Волга и Кама (табл. 14). Они дают 90—95% общего притока воды в водохранилище. Эти реки относятся к рекам с преобладающим снеговым питанием, но значительную роль играют дождевое и грунтовое. Это определяет сезонное распределение стока этих рек. Наибольшее количество

Т а б л и ц а 14

Наиболее крупные притоки Волги и Камы на участке Куйбышевского водохранилища

Приток	Расстояние от устья, км	Длина, км	Площадь водосбора, км²
В о л г а			
Цивиль, правый	1894	155	4600
Большая Кокшага, левый	1880	249	6330
Малая Кокшага, левый . .	1875	155	5080
Илеть, левый	1839	190	6210
Свияга, правый	1794	383	17520
Казанка, левый	1778	149	2800
Большой Черемшан, левый	1465	371	14570
Уса, правый	1404	120	3000
К а м а			
Шешма, левый	166	269	6090
Меша, правый	16	227	4420

воды в водохранилище поступает в период весеннего половодья. В это время Волга дает около 62% годового стока, а Кама примерно 45%. На летне-осенний период падает 26% общего стока Волги, а на зимний — только 12% (Боровкова и др., 1962).

От верховьев Куйбышевского водохранилища Волга течет преимущественно с запада на восток. В соответствии с этим ее притоки на этом

Т а б л и ц а 15

Наиболее крупные притоки Волги на участке Волгоградского водохранилища

Приток	Длина, км	Площадь водосбора, км²	Приток	Длина, км	Площадь водосбора, км²
Сок, левый	345	11280	Чагра, левый	243	3510
Самара, левый	580	46460	Малый Иргиз, левый	194	3850
Чапаевка, левый	332	4210	Большой Иргиз, левый	660	23980
Сызранка, правый	152	5550	Еруслан, левый	380	11480

участке имеют направление с севера на юг (Большая и Малая Кокшаги, Илеть) и с юга на север (Цивиль и Свияга). У Казани Волга круто поворачивает на юг и течет в этом направлении до Жигулевских гор. Огибая их, она создает Самарскую излучину с направлением течения сначала на восток, затем на юг и на запад. Течения притоков, впадающих в Волгу ниже Казани, имеют преимущественно широтное направление (Казанка, Большой Черемшан). Большинство притоков Волги по характеру течения принадлежит к равнинным рекам. Для них типичен плоский и довольно однообразный рельеф бассейна, малое падение основного русла, значитель-

ная извилистость и широкие поймы. Несколько отличны лишь реки Илеть, Казанка и Уса, рельеф бассейна которых более возвышен и холмист.

Гидрографическая сеть на участке Волги между Куйбышевским и Волгоградским гидроузлами развита слабо. Основной рекой, питающей Волгоградское водохранилище, является Волга. Средний многолетний расход ее

Т а б л и ц а 16
Средние многолетние расходы воды и весенний сток ряда притоков Волгоградского водохранилища

Приток	Средний много- летний расход, м³/сек.	Доля весеннего стока, % от годового
Самара	50.0	71
Малый Иргиз	4.0	100
Большой Иргиз	35.5	92
Еруслан	5.85	73

у Волгограда превышает 7900 м³/сек. Следует отметить, что сооружение Рыбинского гидроузла не отразилось существенно на среднегодовом расходе Волги у Волгограда. Норма стока в этом районе волжского бассейна составляет 5.89 л/сек.·км², а изменчивость годового стока Волги равняется 0.18, т. е. значительно меньше, чем в районе Горьковского водохранилища. Неравномерно и внутригодовое распределение стока Волги у Волгограда. Наибольшее количество воды (65%) поступает в водохранилище весной, на летне-осенний период приходится 22%, на зимний — 13%.

Наиболее крупными притоками Волги ниже Куйбышева являются Сок, Самара, Большой Иргиз и Еруслан.

Реки Сон, Самара, Чапаевка и другие, расположенные на территории Высокого Заволжья и получающие обильное подземное питание из пермских известняков, наиболее многоводны и не пересыхают даже в засушли-

вые годы. Реки Сыртового Заволжья (верховье Самары Малый и Большой Иргиз) маловодны и летом часто пересыхают, сохраняя круглогодичный сток лишь в нижнем течении (табл. 16). В Прикаспийской низменности большинство рек имеет только весенний сток. Даже у такой крупной реки, как Еруслан, в межень сток отмечается лишь на нижнем 100-километровом участке.

Приближенно можно считать, что в северной части площади водосбора Волгоградского водохранилища весенний сток притоков составляет около 70% от годового, а в южной около 90%. Поскольку объем среднегодового стока боковой приточности Волгоградского водохранилища составляет лишь около 3% от волжского, то роль последней в гидрологических процессах и, в частности, в формировании водных масс водоема ничтожно мала.

Таким образом, бассейны отдельных водохранилищ волжского каскада имеют существенные различия в некоторых гидрографических характеристиках. Речная сеть в них развита неравномерно. Южнее 50° с. ш. Волга практически лишается притоков и весь сток поступает с верховьев, что хорошо прослеживается на примере Волгоградского водохранилища. Приведенное краткое описание гидрографических условий бассейна Волги от истоков до плотины Волгоградской ГЭС и характеристика водосборов отдельных водохранилищ дает возможность в дальнейшем судить о роли физико-географических особенностей в развитии гидрологических процессов, протекающих в водохранилищах волжского каскада.

Географическое положение и параметры волжских водохранилищ

Территория бассейна Волги от истоков до створа плотины Волгоградского водохранилища простирается с севера на юг на расстояние около 3000 км. Естественно, что при такой протяженности отдельные участки ее оказываются в областях с разными климатическими условиями, а водохранилища располагаются в различных природных зонах. Так, если Ивановское и Угличское водохранилища расположены в зоне смешанных лесов, а Рыбинское и Шекснинское преимущественно в зоне тайги, то самое южное водохранилище — Волгоградское — находится в степной зоне. Некоторые водохранилища располагаются в пределах нескольких зон. Например, правый берег Куйбышевского водохранилища расположен в подзоне смешанных лесов, а левый берег — частично в зоне лесостепи (Авакян и Шарапов, 1968).

Местоположение водохранилищ в различных природных зонах обуславливает их морфологические особенности, характер берегов и затопляемых угодий, что в свою очередь определяет формирование грунтового комплекса, режим взвесей и циркуляцию вод водохранилища. Положение водохранилищ в той или иной природной зоне обуславливает не только особенности развития гидрологических процессов, но влияет и на режим их эксплуатации. При наличии водохранилищ большой емкости, осуществляющих регулирование стока, некоторые водоемы, расположенные ниже таковых, имеют очень небольшую сработку или вообще не срабатываются. Гидроэлектростанции этих водохранилищ работают на транзитной воде.

В настоящей работе обобщены материалы гидрологических исследований по семи водохранилищам волжского каскада. Схема их расположения представлена на рис. 1, а на рис. 2 показан продольный профиль каскада. Общие данные по водохранилищам приводятся в табл. 17. Из этих данных видно, что площадь водного зеркала ряда водохранилищ превышает 1000 км², т. е. по величине площади они близки к крупнейшим есте-

Основные характеристики водохранилищ волжского каскада

Водохранилище	НПУ, м	Площадь зеркала, км²	Емкость, км³		Глубина, м		Коэффициент водообмена	Год заполнения	Характер регулирования
			полная	полезная	средняя	максимальная			
Иваньковское . . .	139	327	1.12	0.96	3.4	19	13.6	1937	Сезонное
Угличское . . .	128	249	1.24	0.81	5.0	23	12.4	1940	»
Шекснинское . . .	128	1669	1.9	1.85				1965	»
Рыбинское . . .	117	4550	25.4	16.7	5.6	30	1.7	1941	Годичное
Горьковское . . .	99	750	8.66	2.8	5.5	22	6.8	1955	Сезонное
Куйбышевское	68	6450	58.0	34.5	9.0	40	5.4	1957	»
Саратовское . . .	43	1950	13.4					1967	Недельное
Волгоградское	30	3120	31.4	8.25	10	40	7.5	1962	»

* НПУ — нормальный подпорный уровень (условные отметки).

ственным озерам. Общая площадь водного зеркала волжских водохранилищ составляет 19 065 км², а полный объем — 141.12 км³.



Рис. 1. Схема расположения водохранилищ в волжском каскаде.

Наиболее значительными по площади и объему являются Куйбышевское, Волгоградское и Рыбинское водохранилища.

Протяженность волжских водохранилищ от створа плотины до выклинивания подпора измеряется сотнями километров. Максимальная ширина многих водохранилищ достигает нескольких десятков километров (Рыбинского — 60 км, Куйбышевского — 35—40 км). Некоторые водохранилища имеют сильную изрезанность берегов. Глубоко вдающиеся по долинам притоков заливы сильно усложняют конфигурацию водоемов (рис. 3).

Максимальная и средняя глубины водохранилищ также различны и зависят от величины подпора и от рельефа затопленной территории. Наиболее глубокими являются Волгоградское и Куйбышевское водохранилища (см. табл. 17). Площадь зеркала, объем, длина и ширина водохранилищ, как и их глубина, изменяются в за-

висимости от величины сработки. Глубина сработки большинства волжских водохранилищ обычно не превышает 4—6 м.

Рассмотрим коротко основные особенности и параметры волжских водохранилищ.

Иваньковское водохранилище. Расположено в южной части Верхневолжской низины и относится к долинному типу (рис. 4). Оно имеет до-

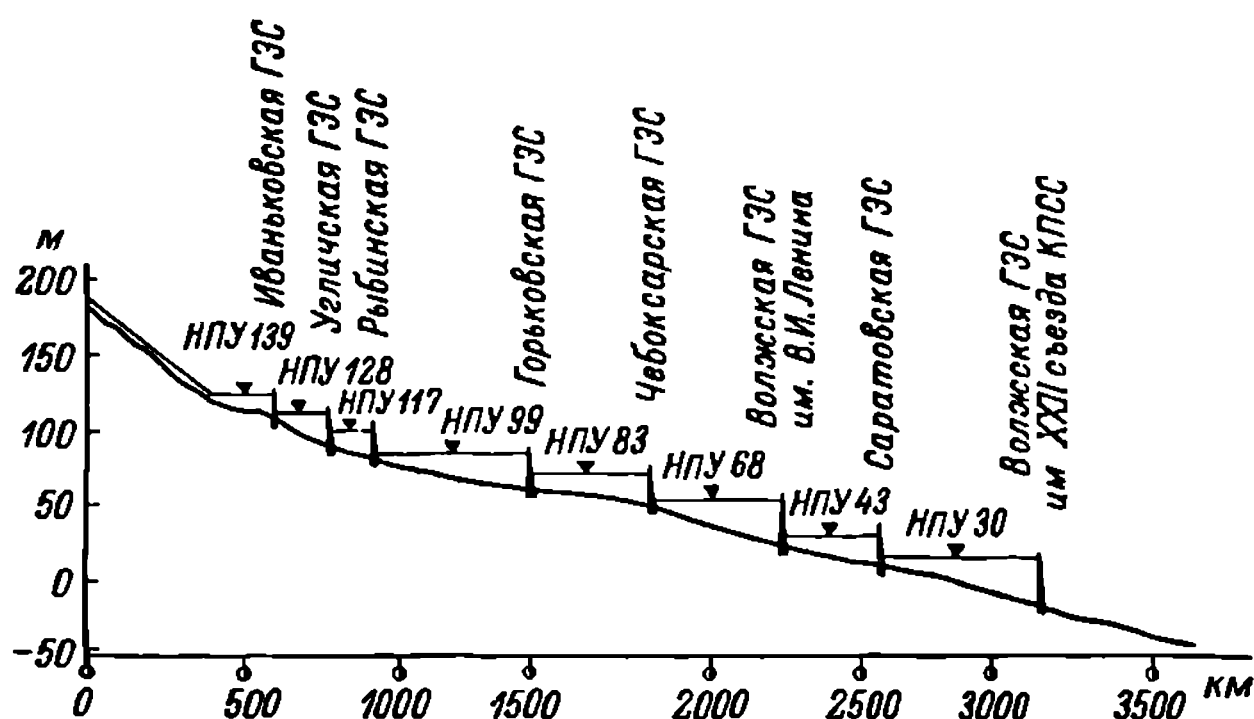


Рис. 2. Продольный профиль каскада ГЭС и водохранилищ на реке Волге (по А. Б. Авакяну и В. А. Шарапову, 1968).

вольно сложную конфигурацию и подразделяется на Иваньковский, Волжский и Шошинский плесы. Иваньковский плес — озеровидный участок водохранилища ниже устья р. Созь, волжский протягивается от устья

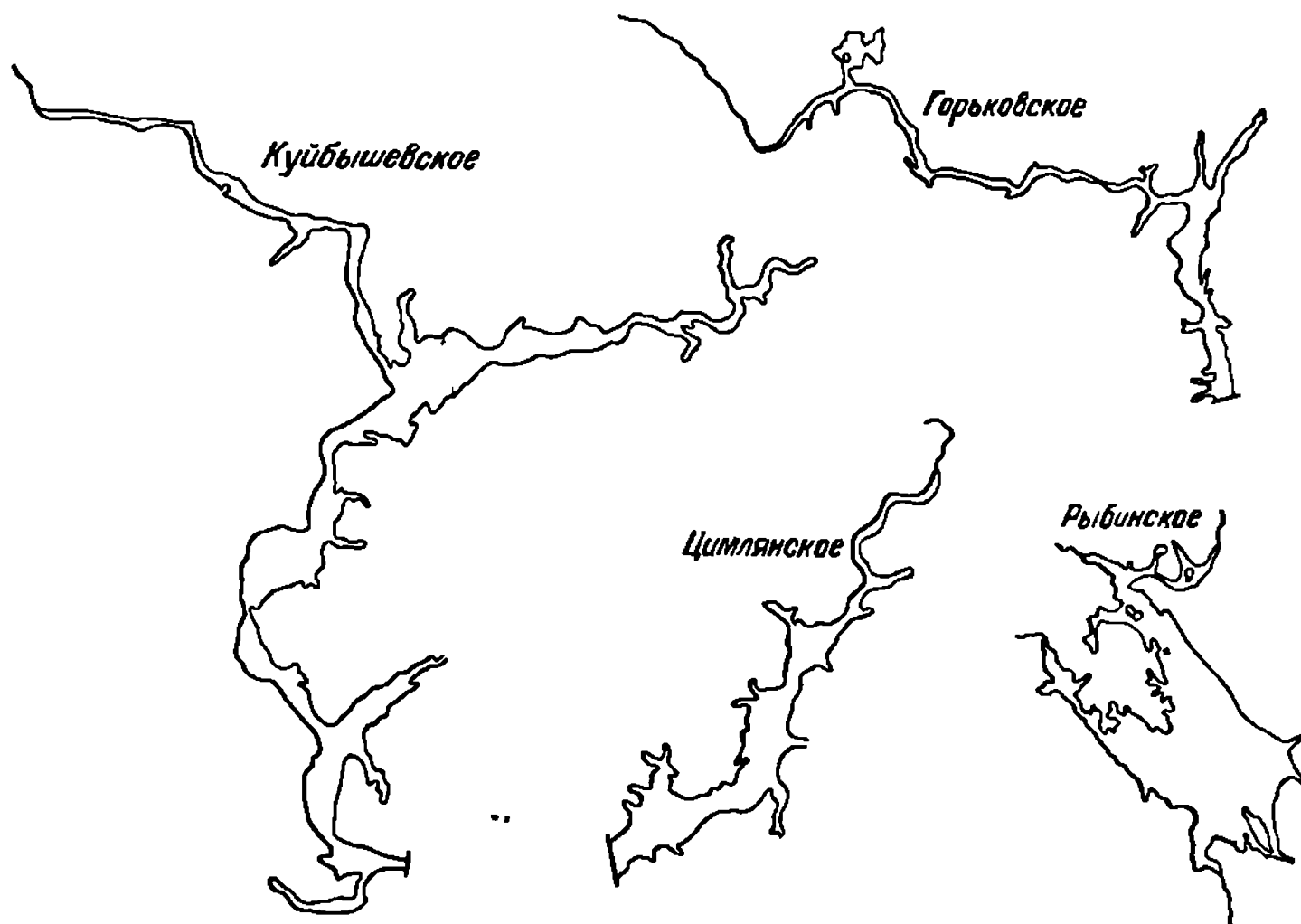


Рис. 3. Конфигурация и сравнительные размеры некоторых водохранилищ (по А. Б. Авакяну и В. А. Шарапову, 1968).

Сози до г. Калинина, Шошинский представляет затопленную долину р. Шоши (Гавеман, 1955).

Площадь зеркала водохранилища при НПУ составляет 327 км², общий объем вод равен 1.12 км³, средняя глубина — 3.4 м. По проектным

данным, нормальный подпорный уровень составляет 139 м. В течение навигационного периода уровень водохранилища колеблется незначительно. Иваньковское водохранилище характеризуется высоким водообменом: средний объем его вод обновляется раз в 26 дней, т. е. менее чем за месяц (Зиминова, 1959).

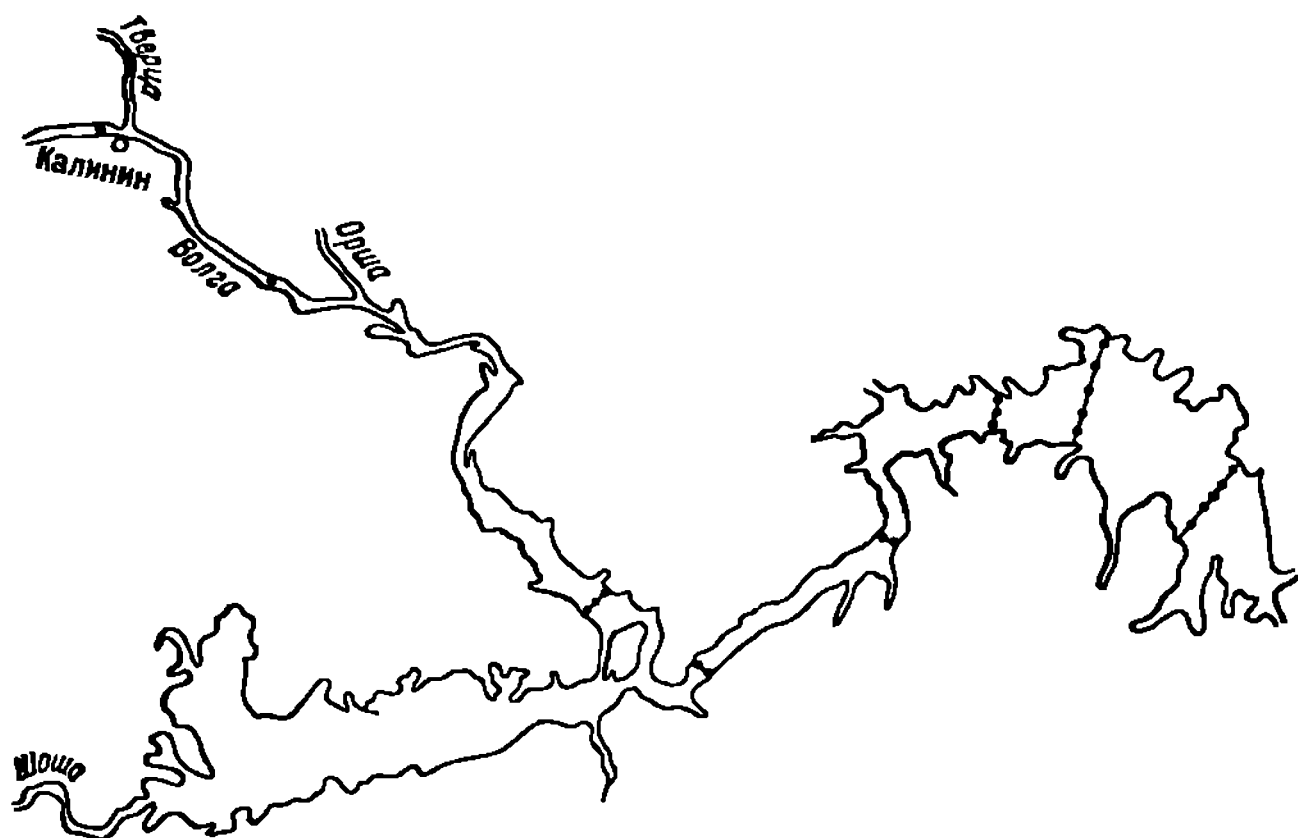


Рис. 4. Схема Иваньковского водохранилища.

Точками обозначены гидрологические станции на основных разрезах.

На гидрологические процессы в водохранилищах, особенно на приплотняных участках верхних и нижних бьефов, существенное влияние оказывает не только режим работы ГЭС, но и расположение входных отверстий турбинных водоводов в теле плотины (Рутковский, 1964). Высота расположения их на Иваньковской ГЭС (от дна) составляет не более половины глубины верхнего бьефа при НПУ. В связи с этим в сбрасываемых



Рис. 5. Схема Угличского водохранилища.

Точками обозначены гидрологические станции на основных разрезах.

в нижний бьеф водах Иваньковской ГЭС большое участие принимают глубинные слои. На гидрологические процессы в Иваньковском водохранилище существенное влияние оказывает наличие канала им. Москвы. Глубина его в головной части составляет 5,5—6 м и он служит основной магистралью для отвода вод из водохранилища (Себенцов и др., 1940).

Угличское водохранилище. Образовано подпором Волги плотинной у г. Углича (рис. 5). Длина его по руслу 150 км, ширина на приплотняном участке 2—3 км. По очертаниям в плане и ширине зеркала, близкой и ширине русла Волги, это водохранилище относится к русловому типу

(Шамов, 1954) и лишь приплотинный участок напоминает водоем долинного типа. По морфометрическим особенностям и различиям водного режима в нем можно выделить три участка: верхний, средний и нижний (Курдина, 1959). Верхний — от Иваньковского гидроузла до устья Медведицы — наиболее узкий речной участок водоема. Средний участок, ширина которого за счет затопленной поймы несколько больше по сравнению с верхним участком, охватывает район от устья Медведицы до сел. Прилуки. Нижний приплотинный участок (от сел. Прилуки до Угличского гидроузла) наиболее широкий и глубоководный.

Нормальный подпорный уровень водохранилища 128 м. Площадь зеркала водохранилища при НПУ равняется 249 км², объем вод 1.24 км³, средняя глубина 5 м, максимальная в русле Волги у Угличской плотины —



Рис. 6. Схема Шекснинского водохранилища.

Точками обозначены гидрологические станции на основных разрезах

23 м. Из-за небольшого объема Угличское водохранилище допускает лишь неполное сезонное регулирование стока. По характеру водообмена водохранилище сходно с Иваньковским: объем водной массы сменяется в среднем раз в месяц.

Расположение входных отверстий турбинных водоводов в теле плотины Угличской ГЭС иное, чем на Иваньковской ГЭС. Здесь высота их почти равна глубине верхнего бьефа при НПУ (Волжский и Камский каскады, 1960), но при расчетном напоре расходы воды через турбины Угличской ГЭС в 3 раза больше, чем на Иваньковской ГЭС. Следовательно, Угличская ГЭС оказывает большее влияние на перемешивание вод, чем Иваньковская.

Шекснинское водохранилище. Возникло в результате перекрытия плотиной р. Шексны у пос. Усть-Угольского. Это водохранилище является частью Волго-Балтийского водного пути и включает участок р. Ковжи, Белое озеро, а также затопленное русло и пойму Шексны от Белого озера до гидроузла. Таким образом, отличительной особенностью рассматриваемого водоема по сравнению с другими волжскими водохранилищами является наличие в его пределах большого естественного озера (рис. 6).

Нормальный подпорный уровень Шекснинского водохранилища 128 м, т. е. немного выше уровня максимального весеннего наполнения Белого озера в бытовых условиях. Площадь зеркала водоема при НПУ 1670 км², в том числе на Белое озеро приходится 1290 км². Общий объем вод равен 6.5 км³, а Белого озера 5.24 км³. Средняя глубина 3.8 м, максимальная глубина в шекснинской части водоема достигает 20 м.

Шекснинское водохранилище обеспечивает сезонное регулирование стока. Его основное назначение — создание необходимых условий для судоходства. В связи с этим уровень его в течение навигационного периода поддерживается на постоянной отметке, близкой к НПУ, и лишь в конце осени — начале зимы производится сработка уровня не более чем на 1.2 м.

В отличие от Иваньковского и Угличского водохранилищ водообмен

в этом водоеме очень низок. По предварительным расчетам М. Г. Ерш (1968), годового коэффициента водообмена менее 1.

Рыбинское водохранилище. В отличие от рассмотренных водохранилищ Рыбинский гидроузел включает в себя два створа сооружения на Волге и на Шексне. Наполнение Рыбинского водохранилища началось в апреле 1941 г., но проектной отметки уровень достиг только в 1947 г. При проектной отметке уровня, равной 117 м, площадь его равна 4550 км², а объем — 25,4 км³. О размерах площади водохранилища в связи с положением уровня можно судить по гипсографической кривой, а о величине объема — по кривой связи объемов с уровнями верхнего бьефа (рис. 7).

Рыбинское водохранилище представляет собой мелководный водоем со средней глубиной при НПУ около 5,6 м. Средняя глубина водоема зависит от положения уровня и может заметно меняться. По площади и объему водной массы Рыбинское водохранилище относится к числу

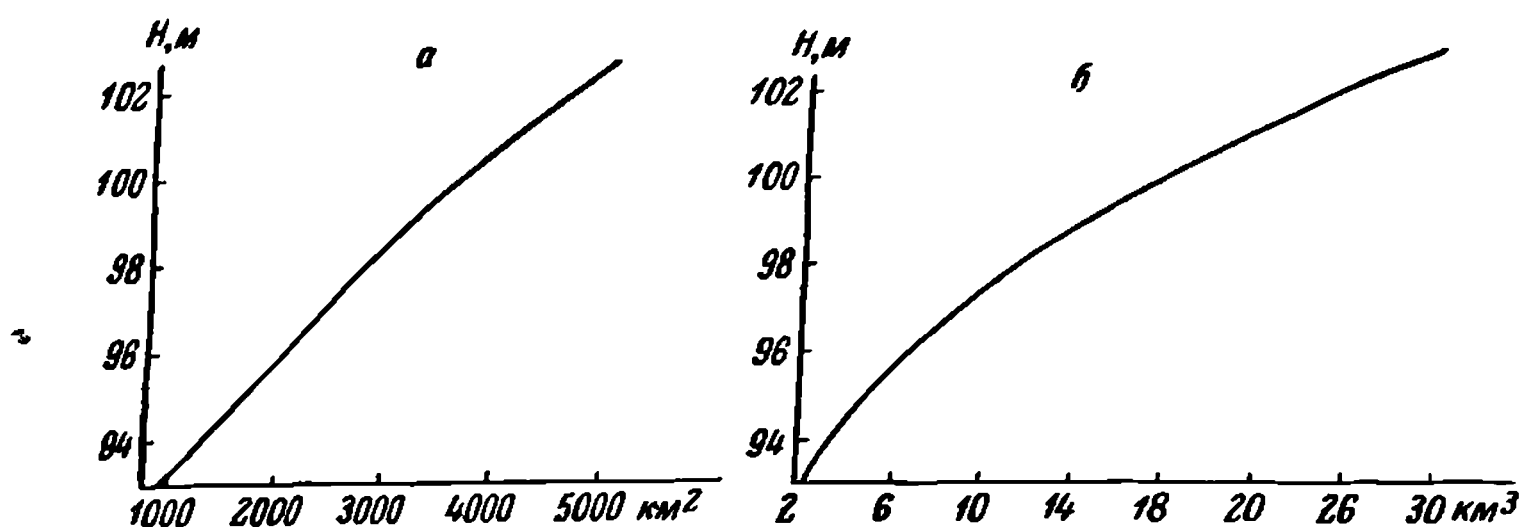


Рис. 7. Кривые зависимости площади зеркала (а) и объема (б) Рыбинского водохранилища от уровня воды.

крупных искусственных водоемов и выделяется среди них по своей конфигурации (см. рис. 3).

Конфигурация Рыбинского водохранилища определилась основными формами Молого-Шекснинской низины, большая ось которой ориентирована с северо-запада на юго-восток. В том же направлении вытянуто и водохранилище. Северо-восточный и юго-западный берега простираются с северо-запада на юго-восток почти параллельно друг другу, несколько сближаясь между собой лишь в южной части водоема. Северо-восточный берег поворачивает и югу от места впадения р. Согожи, а юго-западный, прерываемый руслом Волги, примерно сохраняет свое первоначальное положение до сооружения Рыбинского гидроузла. Оба берега характеризуются незначительной изрезанностью.

Заметно усложняют конфигурацию водохранилища залитые участки долин Волги, Мологи и Шексны вне Молого-Шекснинской низины, а также обширный полуостров, вытянувшийся по бывшему водоразделу Мологи и Шексы к центральной части водохранилища. В зависимости от строения долин затопленные участки их за пределами Молого-Шекснинской низины по своей конфигурации заметно различаются. Так, береговая линия участка Волги от сел. Коприно до Угличской плотины изрезана очень слабо. На всем протяжении этот участок представляет собой полноводную реку, сохраняющую прежнюю конфигурацию берегов. Ширина водной поверхности мало отличается от ширины Волги в период весеннего половодья. Более сложную береговую линию имеет участок Мологи выше устья Ламы. Особенностью его является весьегонское расширение, которое представляет собой широкий мелководный разлив с сильно изрезанными берегами, образовавшийся при затоплении низ-

менной поймы Мологи. Ширина это о р и в н х местах пр -
шает 10 км. Значительно отлич ется п п щад и ко фиг ция б р ов
участок затопленной долины Шексны р п о и н ре \от г -
Шекснинской низины. В этом равон т и ь т п е н и б ш и е
изменные пространства правобережь Ш н , и о у н чит ет -
ном протяжении (примерно от устья Кон ши до б о ю Яг р а
ширина водной поверхности колеблется т 1 д 20 м Ю ападныи
берег этого участка в отличие от се ро- осточи о имеет сил но и ре ан-
ную береговую линию. Тотько выше впадения Суд Шек н не в о ит
из берегов и береговая линия ее з есь и ре н с бо

Морфометрические особенности затоплен и территории в чет ния
с отметкой наполнения и амплитудой ко еб ния уровня пре етяют
деление водоема на обособленные участки, в пре елах к ых гидро-
логические процессы, а также формиров ние донных отл жений и режим
взвесей имеют свои особенности. В н стоящее время еще н ра р б тано
единого, научно обоснованного принципа райониро ания о охранитищ
(Тарвердиев, 1963) и чаще всего деление водоемов о новы ается на их
морфометрических особенностях.

Для Рыбинского водохранилища рассмотрим три таких схемы райо-
нирования: схему Государственного гидрологиче кого институт , исполь-
зованную при экспедиционных исследованиях в 1946—1947 гг., схему
биологической станции «Борок» и схему, предложенную М. А. Фортунат-
товым (1958, 1959). Две первые схемы основаны на гидрографических
признаках. Схема М. А. Фортунатова (1959) постр ена на основании
определения степени окрашенности вод. Разделение водохранилища
на участки согласно указанной схеме представлено на рис. 8.

Преимущество схемы М. А. Фортунатова перед двумя первыми заклю-
чается в том, что она, хотя и неполно, но отражает свойства и особенности
вод, заполняющих отдельные участки водоема. Согласно этой схеме
Рыбинское водохранилище разделяется на четыре основных района, или
плеса: Волжский, Моложский, Шекснинский и Главныи, обозначенные
на рис. 8 римскими цифрами. Каждый район делится на подрайоны или
части, которые обозначены арабскими цифрами. В пределах каждого
подрайона могут быть выделены отдельные участки, отмеченные на том же
рисунке буквами. М. А. Фортунатов считает, что число районов и под-
районов следует сохранять неизменным независимо от масштаба состав-
ления карты районирования, а число участков можно уменьшать или
увеличивать в зависимости от масштаба, в котором производится карти-
рование. При крупномасштабном картировании в таком водоеме, как
Рыбинское водохранилище, можно выделять и оконтуривать при необ-
ходимости даже отдельные биотопы.

Разделяя в принципе взгляды М. А. Фортунатова по вопросу райони-
рования Рыбинского водохранилища, мы считаем необходимым отметить,
что такая детализация деления водоема на участки может быть полезна
только в исключительных случаях, при решении отдельных частных во-
просов, связанных с режимом водохранилища. При комплексных ис-
следованиях и в частности при изучении гидрологических процессов
и динамики водных масс излишняя детализация в районировании водоема
затрудняет анализ материалов и оказывается искусственной и бесполезной.
В связи с этим мы ограничиваемся делением водохранилища лишь на
четыре основных участка: волжский, моложский, шекснинский и централь-
ный, границы которых в общем совпадают с границами районов схемы
М. А. Фортунатова (1959). Такое деление, не претендующее на большую
точность, помогает подчеркнуть морфометрические особенности того
или иного участка водохранилища и в некоторой степени объясняет
специфику гидрологических процессов, протекающих в них.

Горьковское водохранилище. По сравнению с Рыбинским водохранилищем представляет собой водоем иного типа. Он сильно вытянут и относительно неширок, образован в результате затопления долины Волги и ряда приустьевых участков ее притоков (рис. 9). Длина его 434 км, средняя ширина при НПУ около 3.5 км, наибольшая — 16 км. Площадь зеркала 1570 км², полный объем вод 8.7 км³, полезная емкость 2.8 км³ (Волжский и Камский каскады гидроэлектростанций, 1960). Средняя глубина водоема при НПУ — 5.5 м, наибольшие глубины расположены по руслу Волги и возрастают в направлении к плотине, где достигают максимальной величины 22 м.

Подпор от Горьковской плотины распространяется по Волге вплоть до Рыбинского гидроузла, а по крупнейшему притоку ее — Унже —

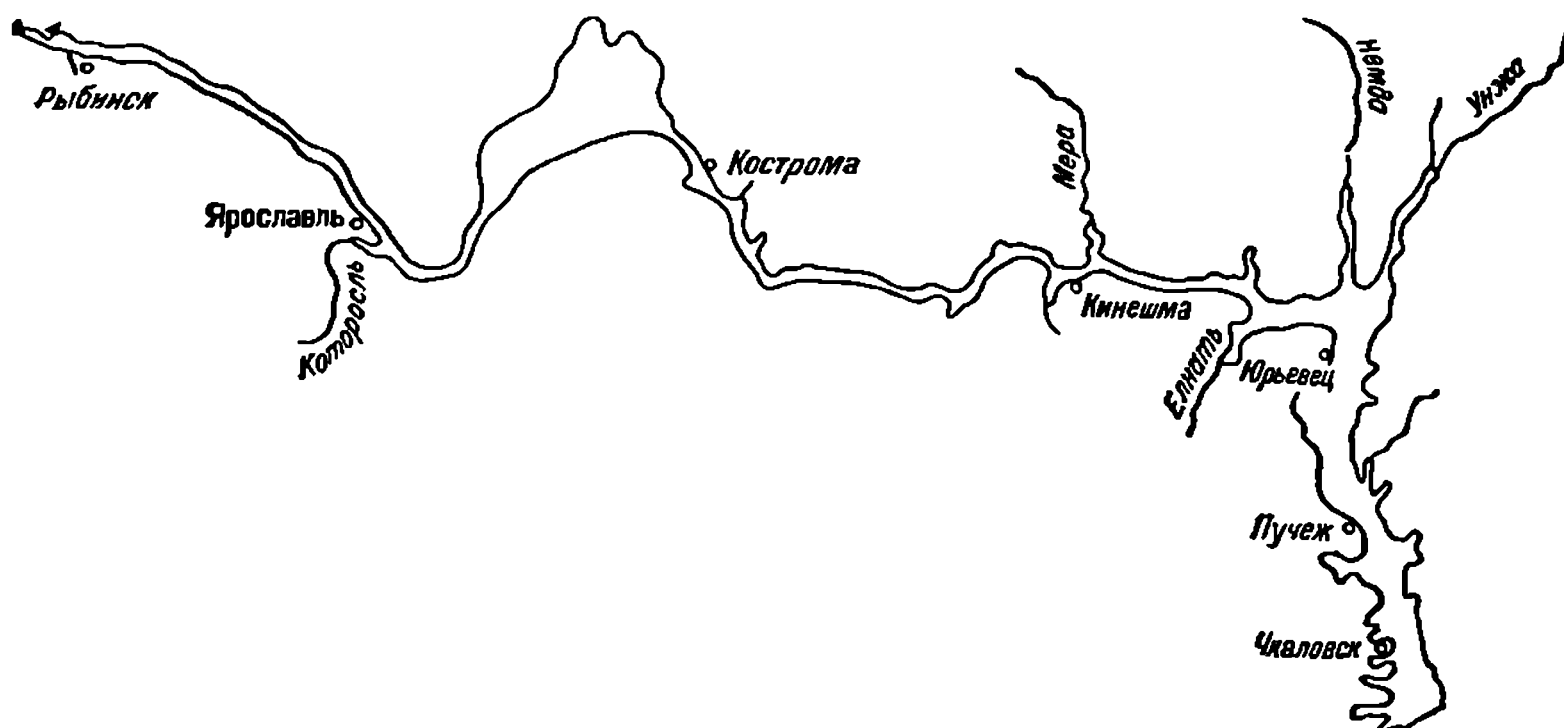


Рис. 9. Схема Горьковского водохранилища.

на 65—70 км от бывшего устья. Горьковское водохранилище обеспечивает сезонное регулирование стока Волги и необходимые для судоходства глубины не только в его верховьях до Рыбинска, но и на незарегулированном участке реки ниже Горьковского гидроузла. Ежегодная предвесенняя сработка водохранилища не превышает 2.0 м.

Конфигурация его берегов и морфометрия определяются особенностями строения долины Волги и приустьевых участков ее притоков. Несмотря на то, что подпор достигает по Волге г. Рыбинска и распространяется далеко по ряду притоков Волги, в целом берега водохранилища, за исключением участка от г. Юрьевца до плотины, имеют слабую извилистость.

От Рыбинска до Костромы водохранилище сохраняет в основном конфигурацию речного русла до затопления. Ширина водной поверхности на этом участке, как и глубина, мало отличается от тех же характеристик реки в период весеннего половодья. Наиболее приглубым является правый берег, у которого подводный склон более крутой. В связи с этим глубины от правого берега быстро увеличиваются по направлению к руслу (у Рыбинска 3—6 м, а ниже Кинешмы 12—17 м). Под влиянием сохранившихся крупных форм руслового рельефа реки глубины по руслу хотя и имеют общую тенденцию к увеличению по течению воды, но все же резко меняются. Береговая линия этого участка изрезана слабо. Только в устьях речек и ручьев образовались небольшие заливчики. Наиболее значительный из них возник в устье р. Которосли у Ярославля.

Особое положение в водохранилище занимает костромское расширение. Оно представляет собой обособленный широкий мелководный плес, ко-

торыи образовался на пойме р. Костромы в центральной части Костромской низины. Площадь его по данным проектных организаций, составляет 260 км². Наибольшие глубины при НПУ равняются 7—9 м и отмечаются в руслах затопленных рек, а также на месте бывших пойменных озер. Соединяется костромское расширение с руслом Волги узким искусственным проливом.

От Костромы до устья Желваты водохранилище снова представляет полноводную реку, почти не выходящую из старых берегов Волги. Ширина этого участка по ходу воды постепенно увеличивается и в районе Кинешмы превышает 1 км. Наиболее значительное подтопление суши произошло здесь по пойме р. Меры, левобережному притоку Волги. В устьевом участке ее образовался залив, ширина которого в отдельных местах мало отличается от ширины водохранилища в этом районе.

Ширина водохранилища резко увеличивается ниже устья Желваты, а в устье самой Желваты образовался большой залив, который остается сравнительно широким почти до выклинивания подпора. Такой же залив возник и по руслу р. Елнати, правобережному притоку Волги.

Наиболее широко водохранилище в районе впадения Немды и Унжи. Ширина его от г. Юрьевца до восточного берега устья Унжи достигает максимальной величины. По долинам Немды и Унжи образовались большие, но сравнительно мелководные заливы. От г. Юрьевца до г. Пучежа западный берег водохранилища изрезан слабо. Лишь южнее Пучежа образовался крупный залив по р. Ячменке и ее притокам. Восточный берег водохранилища изрезан более сильно, чем западный. Почти на всем его протяжении до плотины встречаются многочисленные заливы, острова и мелководья, поросшие растительностью.

Для того чтобы выявить особенности режима отдельных участков водохранилища, целесообразно произвести его районирование. Как и при районировании Рыбинского водохранилища, в основу положены морфометрические особенности водоема. С учетом рельефа затопленной речной долины в крупных русловых водохранилищах бассейнов Волги, Камы, Дона и Днепра С. Л. Вендров (1955, 1959а, 1959б) выделяет следующие специфические зоны (районы): нижняя, средняя, верхняя, зона выклинивания подпора и зона малых и средних заливов. Несмотря на то что такое районирование водохранилищ, расположенных в долинах рек, предложено С. Л. Вендровым в связи с изучением процессов динамики береговой полосы, оно, несомненно, применимо и при изучении гидрологического режима водохранилищ. Поэтому при районировании Горьковского водохранилища мы воспользовались схемой С. Л. Вендрова, но с учетом продольного профиля затопленной реки. В отличие от других схем районирования подобных водохранилищ, в частности Куйбышевского, предложенных А. В. Лукиным (1958), В. М. Широковым (1959) и Н. А. Дзюбаном (1960), схема С. Л. Вендрова, помимо морфометрических особенностей района, учитывает динамику его водной массы, а также процессы взаимодействия ее при определенных синоптических условиях с дном водоема и береговой чертой.

Для выделения характерных участков Горьковского водохранилища и для построения его продольного профиля мы воспользовались сокращенным продольным профилем Волги, построенным Н. А. Богуславским (1887). На этот профиль (рис. 10), на котором показаны условный горизонт воды, отнесенный к летней межени, и условный горизонт половодья, мы нанесли линию НПУ и горизонта предполоводной сработки водохранилища. Кроме того, перевели горизонтальный и вертикальный масштабы Богуславского из старой русской системы мер в метрическую. Полученная схема и послужила основой для выделения следующих участков водохранилища.

Приплотинный участок — участок водохранилища от плотины до устья Елнати (так называемый Юрьевецкий разлив). Это наиболее широкий участок водохранилища. Ширина его местами превышает 10 км. При любом положении уровня этот участок не имеет уклонов водной поверхности и водный режим его очень похож на режим слабопроточных озер. Стоковые течения, за исключением вызываемых сбросом воды через гидросооружение, не наблюдаются. При отсутствии ветрового перемешивания в весенне-летний период отчетливо прослеживается вертикальное термическое расслоение водной массы. Почти на всей акватории участка сохраняются большие глубины, которые при отсутствии ледяного покрова не препятствуют свободному развитию волнения и ветровых течений. Вследствие этого на приплотинном участке наблюдается наиболее интенсивное разрушение береговой полосы.

Переходный участок — участок водохранилища от устья Елнати до Костромского разлива протяженностью 170 км. Он походит

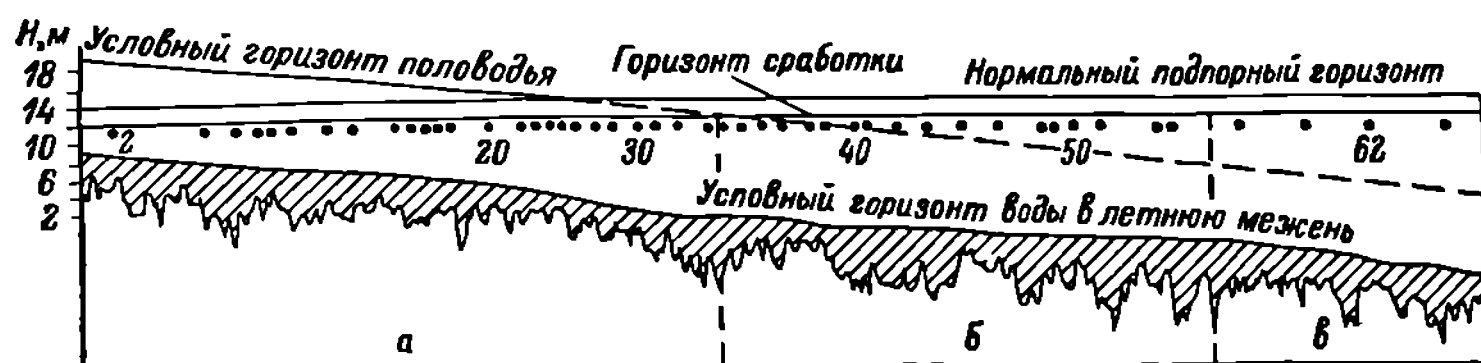


Рис. 10. Схема районирования Горьковского водохранилища.

а — участок выклинивания подпора; *б* — переходный участок; *в* — приплотинный участок. Точками обозначены станции.

на Волгу во время половодья. На этом участке по бывшему руслу Волги отчетливо прослеживаются постоянные стоковые течения, средняя скорость которых от Костромы до Кинешмы колеблется от 0.30 до 0.20 м/сек. Ниже Кинешмы она понижается (0.20 м/сек.), а с приближением к нижней границе участка уменьшается до пределов чувствительности вертушки (0.04 м/сек.). Расширение ложа водоема произошло здесь в основном за счет затопления низменного левого берега и приустьевых участков притоков. Поэтому ширина участка невелика. Такие условия мешают нормальному развитию ветрового волнения. В результате разрушающая роль его очень мала и разрушения берегов не наблюдается. Однако волнение, как и течение, на этом участке более активно, чем на приплотинном. Воздействуя на дно водохранилища, оно интенсивно нивелирует его. Именно на переходном участке, где наблюдается постепенное затухание скорости течения от верхней его границы к нижней, выпадает основное количество влекомых и взвешенных наносов и происходит заполнение ими понижений рельефа дна водохранилища (Вендров, 1955).

Участок выклинивания подпора. Участок водохранилища от Костромского разлива до Рыбинской плотины. Если переходный участок представляет собой нечто промежуточное между озером и рекой, то участок выклинивания подпора не имеет никаких озерных черт. Даже при НПУ зеркало воды здесь большей частью расположено в пределах русла реки. Неширокая полоса затопленной поймы весьма мелководна. На этом участке наблюдаются постоянные продольные уклоны водной поверхности. Так, 29 декабря 1958 г. уклон водной поверхности между г. Рыбинском и г. Тутаевым составлял 0.04‰, а 2 апреля между Ярославлем и Костромой — 0.026‰. При таких уклонах водной поверх-

ности скорости течения могут иногда превышать 0.50—0.60 м/сек. Водный режим на данном участке значительно усложняется влиянием попусков воды из Рыбинского водохранилища.

Морфометрические особенности участка препятствуют возникновению ветровых волн. Разрушение береговой полосы, а также формирование подлодного рельефа происходит здесь только под действием постоянных стоковых течений.

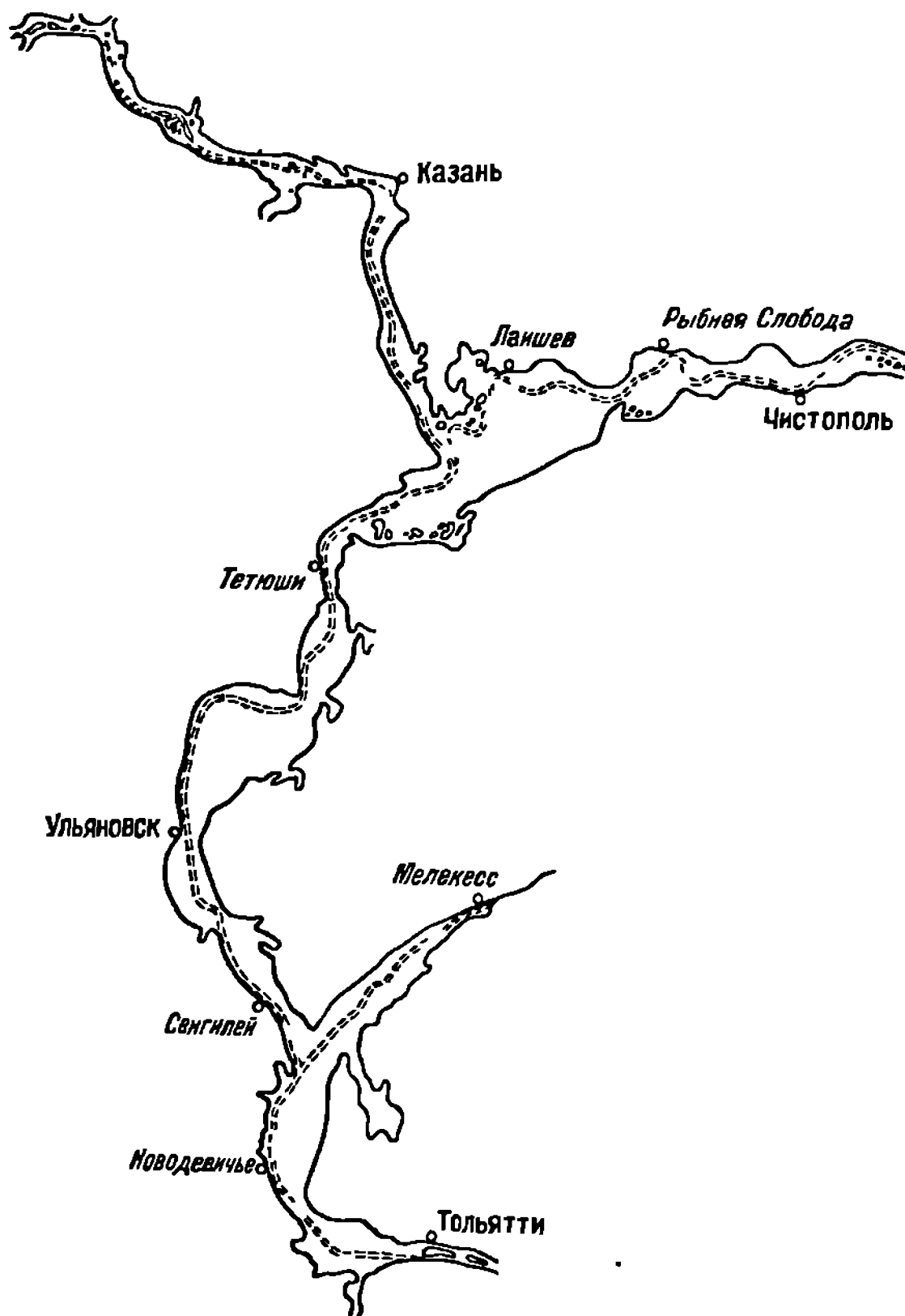


Рис. 11. Схема Куйбышевского водохранилища.

Костромской разлив. Этот участок представляет собой обособленный широкий мелководный плес водохранилища, который образовался по бывшей пойме Костромы в центральной части Костромской низины. Берега разлива сильно изрезаны и образуют большое количество мелководных заливов.

Костромской разлив по водному режиму имеет некоторое сходство с приплотинной зоной. При тихой погоде в весенне-летний период отмечается термическое расслоение водной массы. Стоковые течения наблюдаются только в районе соединения Костромского расширения с переходным участком водохранилища. Несмотря на значительную ширину костромского расширения, сильная изрезанность его береговой черты и

мелководность препятствуют развитию здесь интенсивных ветровых волнений.

Таким образом, при районировании Горьковского водохранилища мы, помимо его морфометрических особенностей, попытались учитывать динамику вод, а также процессы взаимодействия их с ложем водохранилища, что, на наш взгляд, наиболее объективно позволяет подойти к решению вопроса о районировании водохранилищ подобного типа и глубже понять специфику гидрологического режима этих водоемов.

Куйбышевское водохранилище. Геоморфологические особенности затопленной долины Волги определили весьма сложную конфигурацию Куйбышевского водохранилища (рис. 11). Коэффициент извилистости береговой линии равен 8.8 (Широков, 1962). Такая большая извилистость связана прежде всего с наличием крупных заливов (Усинского, Мелекесского, Сусканского и Свияжского), глубоко вдающихся в берега водоема. Оказывает влияние и овражно-балочная сеть затопленных рек, широко развитая в районе водохранилища.

Водохранилище имеет ряд четко выделяющихся озеровидных расширений, отделенных друг от друга сравнительно узкими участками водоема в районах мелких куполовидных тектонических поднятий. Некоторые морфометрические характеристики наиболее крупных озеровидных участков водохранилища представлены в табл. 18.

Таблица 18

Морфометрические характеристики отдельных озеровидных участков
Куйбышевского водохранилища
(по В. М. Широкову, 1959)

Показатель режима	Характеристика	Прип- лотинный	Новоде- вичский с Мелекесским заливом	Нижне- Ульин- ский	Верхне- Ульин- ский	Нижне- Тетюшский	Верхне- Тетюшский	Волжско- Камский
При нормаль- ном подпор- ном уровне	Площадь зеркала, км ²	397	1154	435	757	367	547	1042
	Объем воды, км ³	6.853	13.563	7.079	8.584	3.566	4.515	5.719
	Средняя глубина, м	17.30	11.70	16.30	11.30	9.70	8.30	5.47
При навига- ционной сра- ботке уровня	Площадь зеркала, км ²	362	904	422	670	297	399	623
	Объем воды, км ³	5.342	9.485	5.357	5.674	2.220	2.620	2.256
	Средняя глубина, м	14.70	10.50	12.70	8.48	7.55	6.57	3.62
При предполо- водной сра- ботке уровня	Площадь зеркала, км ²	348	807	410	596	247	314	360
	Объем воды, км ³	4.633	7.779	4.524	4.414	1.677	1.901	1.283
	Средняя глубина, м	13.30	9.69	11.00	7.40	6.80	6.06	3.56

Общая протяженность водоема более 600 км. В настоящее время площадь его равна 6448 км², объем водной массы составляет 58 км³ (Никулин, 1958). После сооружения Чебоксарского и Нижнекамского водохранилищ длина водоема несколько уменьшится, причем площадь зеркала при НПУ будет около 6000 км², а объем — 56 км³. Наибольшая ширина водохранилища в районе слияния Волги и Камы достигает 40 км, а максимальные глубины в приплотинной части порядка 40 м. Средняя глубина водоема 9 м.

Куйбышевское водохранилище отличается от других водохранилищ волжской системы большой полезной емкостью — 34.6 км³, тогда как полезная емкость всех верховолжских водохранилищ (Иваньковского,

Угличского, Рыбинского и Горьковского) составляет лишь 16 км³ (Близняк и Андреянов, 1958)

Волгоградское водохранилище. В настоящее время Волгоградское водохранилище представляет собой нижнюю ступень волжского каскада. Створ плотины гидроузла расположен в 500 км от устья Волги. Это водохранилище образовалось главным образом за счет затопления территории низменного левобережья Волги и долин некоторых ее притоков. На значительном протяжении его приплотинной части полностью затоплена пойменная терраса и почти полностью надпойменная. В средней части почти полностью затоплена пойма и часть первой надпойменной террасы, а примерно на 200-километровом участке, примыкающем к Куйбышевскому гидроузлу, водохранилище не выходит за пределы поймы. Вследствие

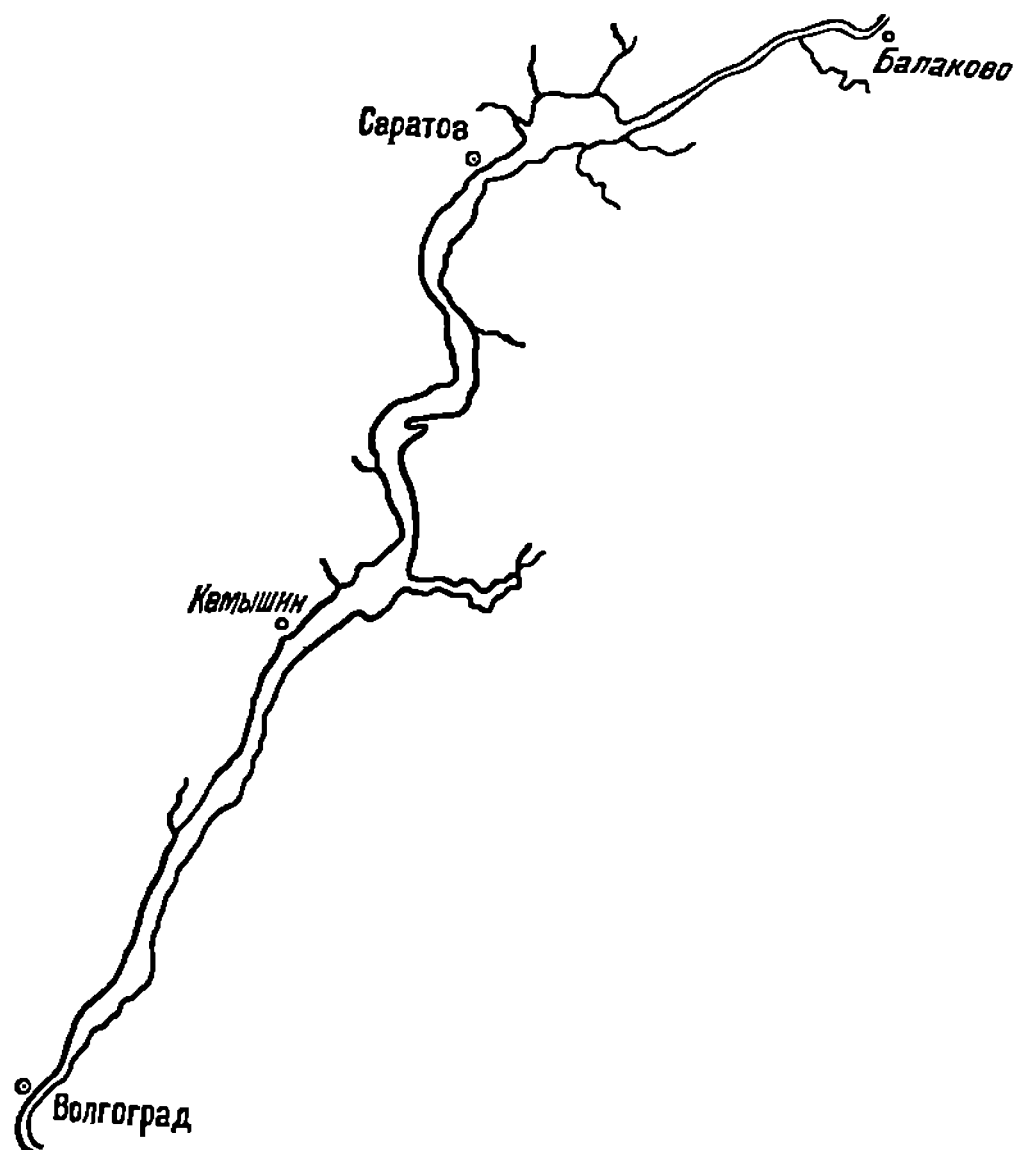


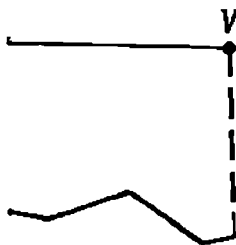
Рис. 12. Схема Волгоградского водохранилища.

этого ширина Волгоградского водохранилища невелика и составляет в среднем 5,7 км, достигая лишь у Камышина 14 км. Общая протяженность его около 600 км, площадь зеркала 3387 км², полный объем 32,5 км³, полезный — 9,3 км³ (Волков и Филиппов, 1960). Извилистость береговой линии водохранилища невелика (рис. 12).

К моменту окончания строительства Волгоградской ГЭС в бассейне Волги работало шесть крупных гидроэлектростанций (Иваньковская, Угличская, Рыбинская, Горьковская, Волжская им. В. И. Ленина и Камская), располагающих регулируемыми водохранилищами с суммарной полезной емкостью около 50 км³. С созданием нового гидроузла полезная емкость водохранилищ еще увеличилась. В таких условиях сработка Волгоградского водохранилища оказывается невыгодной и предусматривается лишь в отдельные маловодные периоды для поддержания гарантированной водо- и энергоотдачи. В соответствии с этим Волгоградское водохранилище поддерживается постоянно на нормальной подпорной отметке, а гидроэлектростанция работает на транзитной воде. Это обстоятельство обуславливает ряд специфических особенностей режима водохранилища.

доохранилищ
иически раз-
ое водохра-
да как Горь

лище суще-
сей его пло-
на наиболее
го-западного
в открытой
ского полу-
юго острова,
нах глубины



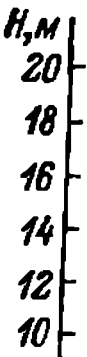
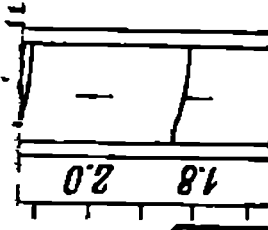
(ней глубине
ма. Зона их
нно большие
ексинского
В открытой
атопленному

Раст	2	23	24	25
Пл				

ую площадь
ь к северу
тся в откры-
ья Конгоры.
охранилища
юго Молого-
х участках.

ца на Пучежскойейтово и два
олого-Шекс-
Измайлово).
понижением
зводным уча
и и Мыли и

эпоп . 12 . эв



9a

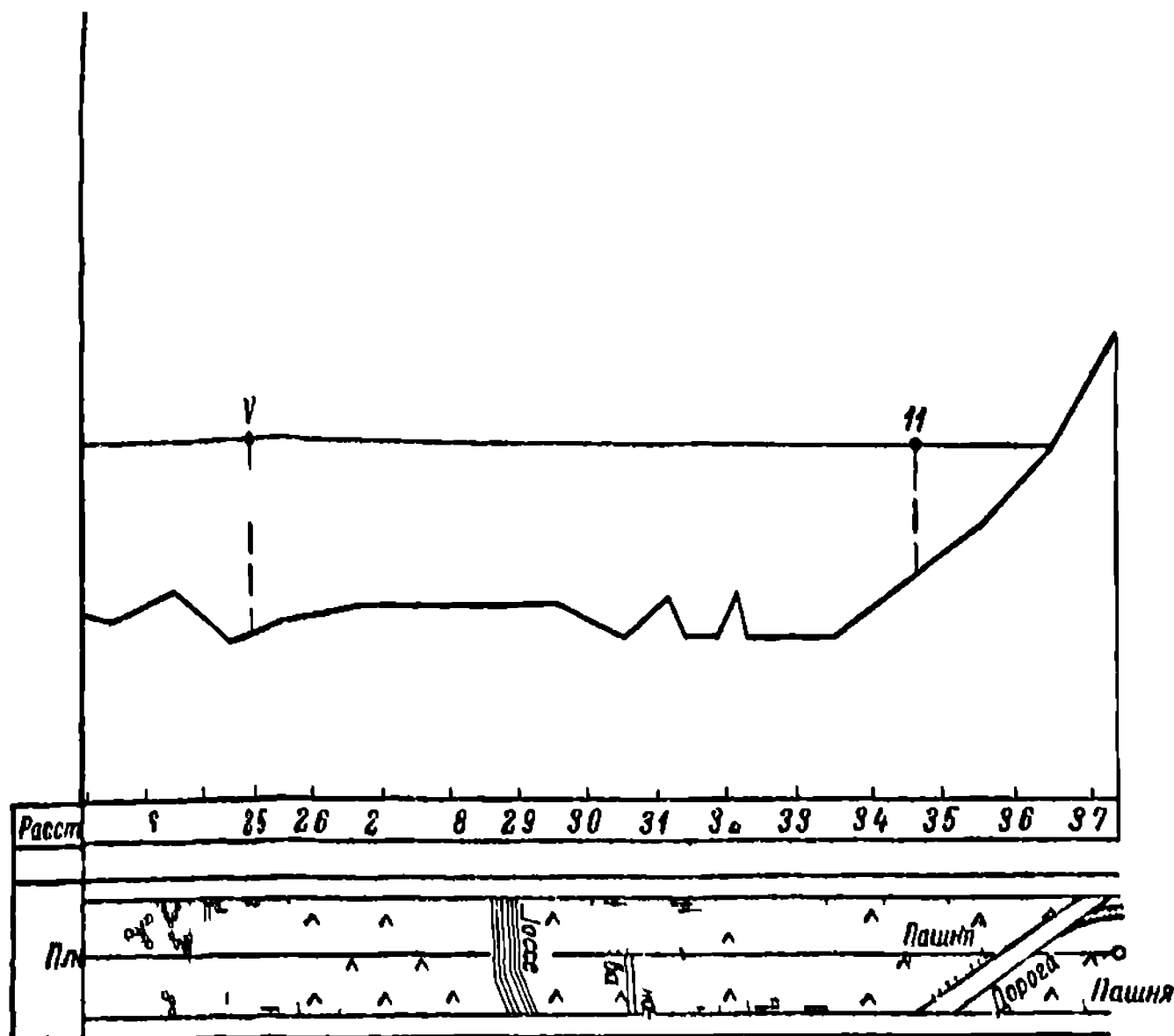
Правый

ам основных
й обширных
о глубинах
лища с опи-

(охранилища
я на участке
ы постепенно
от 14—18 м,

а в открытой части водохранилища достигают 20 м. Максимальная глубина по затопленному руслу Волги составляет 23 м. Некоторое представление о распределении глубин по поперечному сечению волжского участка водохранилища и особенностях рельефа дна в нем можно получить из профилей, записанных с помощью эхолота.

Ниже Угличской ГЭС русло Волги имеет хорошо выраженную корытообразную форму с крутыми ровными склонами и небольшими поднятиями дна (рис. 14, а). По ходу воды оно постепенно расширяется и у деревни Юрино, сохраняя в основном прежнюю форму, имеет более пологие склоны и практически ровное дно (рис. 14, б). С залитием пойменных участков



да на Пучежном отворе



регулирующими водохранилищами с суммарной полезной емкостью около 50 км³. С созданием нового гидроузла полезная емкость водохранилищ еще увеличилась. В таких условиях сработка Волгоградского водохранилища оказывается невыгодной и предусматривается лишь в отдельные маловодные периоды для поддержания гарантированной водо- и энергоснабжения. В соответствии с этим Волгоградское водохранилище поддерживается постоянно на нормальной подпорной отметке, а гидроэлектростанция работает на транзитной воде. Это обстоятельство обуславливает ряд специфических особенностей режима водохранилища

Выявление особенностей рельефа и грунтов водохранилищ горьковского каскада проводится на примере двух морфометрически различных водоемов Рыбинского и Горьковского. Рыбинское водохранилище по размерам и конфигурации напоминает озеро, тогда как Горьковское является типичным долинным водохранилищем.

По характеру распределения глубин Рыбинское водохранилище существенно отличается от естественных водоемов. Свыше $1/5$ всей его площади занимают глубины от 0 до 2 м (рис. 13). Мелководная зона наиболее развита вокруг Молого-Шекснинского полуострова и вдоль юго-западного побережья водохранилища. Малые глубины встречаются и в открытой части водоема, особенно на продолжении Молого Шекснинского полуострова и вблизи северо-восточного побережья в районе большого острова, расположенного к юго-западу от устья Конгоры. В этих районах глубины до 2 м можно обнаружить на расстоянии 12 км от берега.

Глубины до 6 м, соответствующие приблизительно средней глубине водохранилища, занимают свыше половины площади водоема. Зона их распространения вдоль всего побережья водохранилища. Особенно большие площади с такими глубинами расположены у Молого Шекснинского полуострова и по Шексне, к северо-западу от устья Маткомы. В открытой части водохранилища изобата 6 м проходит прежде всего по затопленному Молого Шекснинскому водоразделу, охватывает значительную площадь на продолжении Каменниковского полуострова, простираясь к северу от него на 16 км. У северо-восточного берега она глубоко вдается в открытую часть водохранилища в юго-западном направлении от устья Конгоры.

Глубины свыше 8 м занимают лишь 27,3% площади водохранилища и располагаются преимущественно по обе стороны от затопленного Молого Шекснинского водораздела на трех песчолоско разобщенных участках. Один из них находится на Мологе к северу-востоку от пос. Брейтово и два на Шексне (первый севернее восточнее южной оконечности Молого Шекснинского полуострова, а второй юго-западнее деревни Измайлово). Оба шекснинских участка соединяются между собой руслом и понижением рельефа левобережной поймы Шексны. С моложским глубоководным участком они соединены затопленными руслами протоков Шуйги и Мыли и р. Пушмы.

Наибольшие глубины водохранилища встречаются по руслам основных рек (в виде отдельных понижений дна) и не представляют собой обширных обособленных участков. Ниже приводятся некоторые данные о глубинах по затопленным руслам рек и отдельным участкам водохранилища с описанием рельефа дна водоема.

По затопленному руслу Волги глубины в пределах водохранилища изменяются от 10 до 20 м. Наименьшие глубины встречаются на участке от Угличской плотины до пос. Мышкино. По ходу воды глубины постепенно увеличиваются и от пос. Мышкино до с. Коприно составляют 14–18 м, а в открытой части водохранилища достигают 20 м. Максимальная глубина по затопленному руслу Волги составляет 23 м. Некоторое представление о распределении глубин по поперечному сечению волжского участка водохранилища и особенностях рельефа дна в нем можно получить из профилей, записанных с помощью эхолота.

Ниже Угличской ГЭС русло Волги имеет хорошо выраженную корытообразную форму с крутыми ровными склонами и небольшими поднятиями дна (рис. 14, а). По ходу воды оно постепенно расширяется и у деревни Юрино, сохраняя в основном прежнюю форму, имеет более пологие склоны и практически ровное дно (рис. 14, б). С слиянием пойменных участков

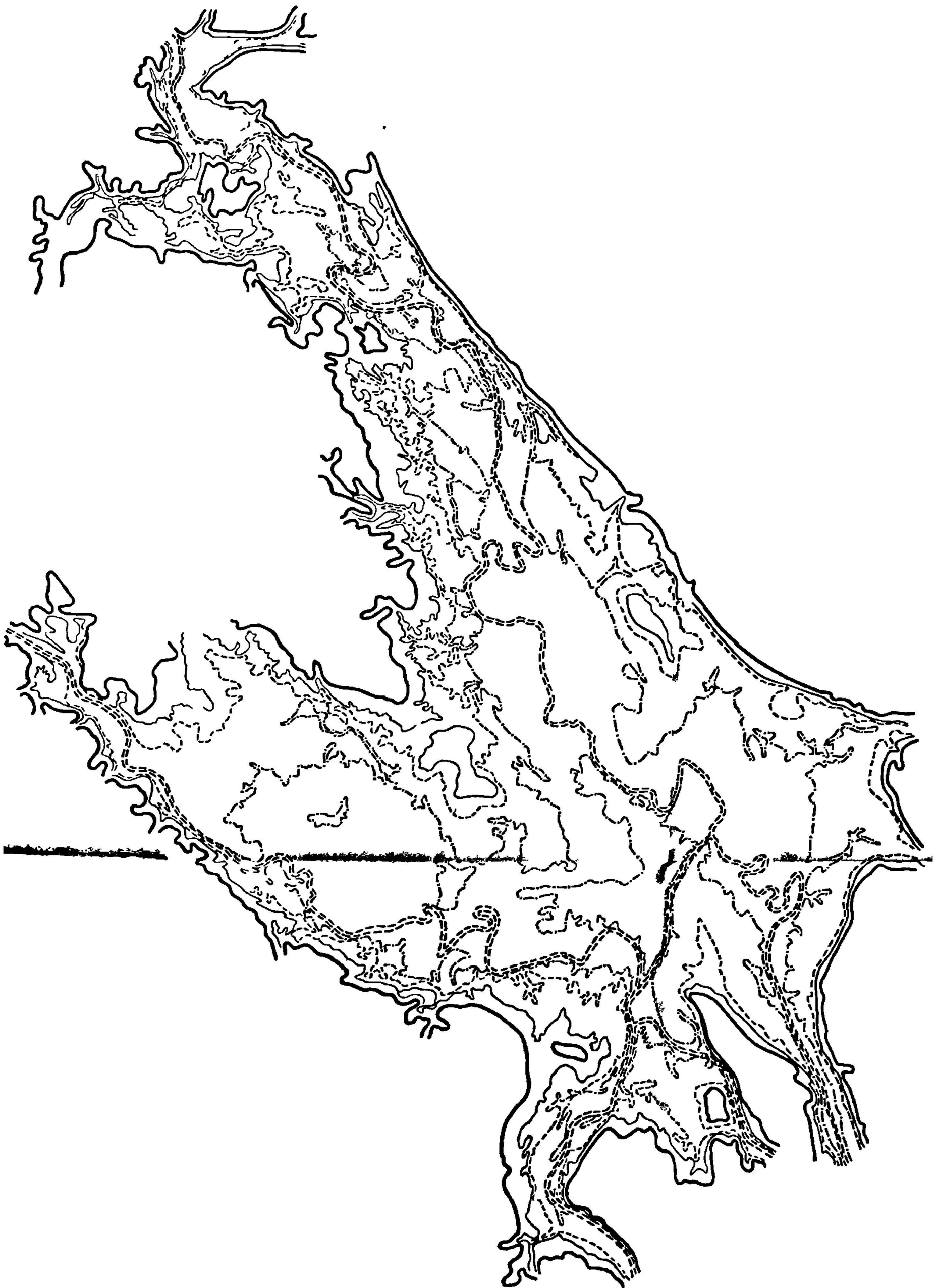


Рис. 13. Распределение глубин в Рыбинском водохранилище.
Линией пунктирной линией обозначены русла рек.

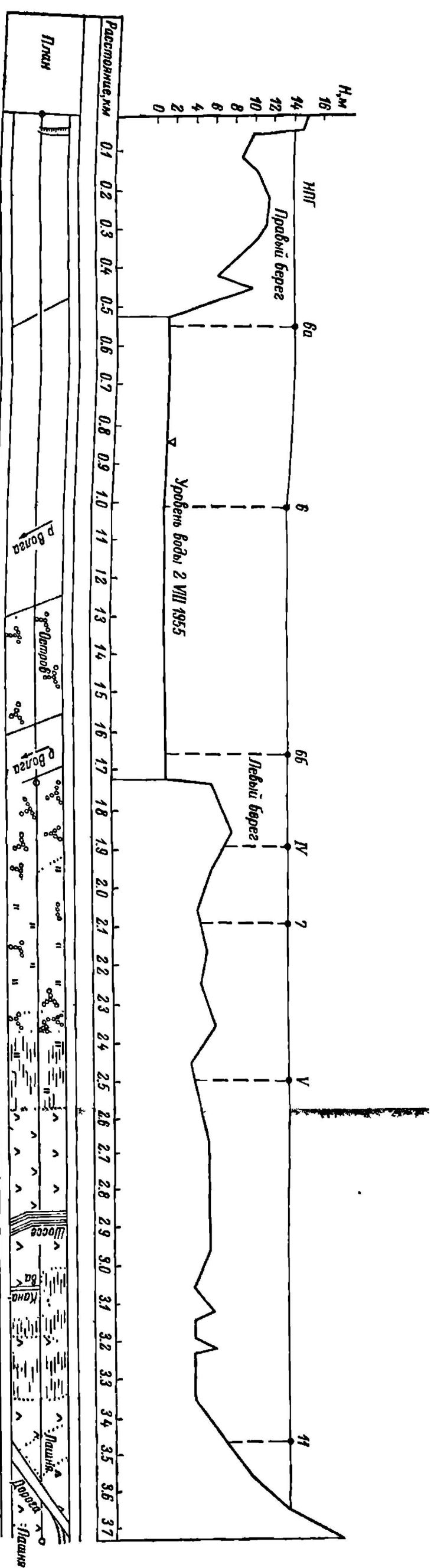


Рис. 20. Поперечный профиль дна Горьковского водохранилища на Пучежском створе.
Обозначения те же, что и на рис. 19.

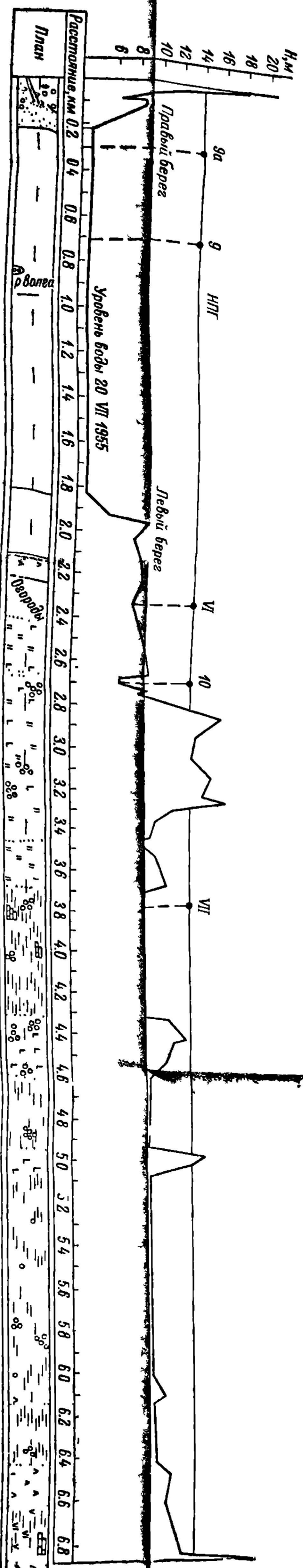


Рис. 21. Поперечный профиль дна Горьковского водохранилища на Юрьевском створе.
Обозначения те же, что и на рис. 18.

профиль дна водохранилища значительно усложняется. Как видно из рис. 14, в районе Коприно рельеф дна водоема более сложен, особенно на его южной части, по которой проходит русло Сутки. Таким образом рельеф дна водоема участка водохранилища от плотины Угличской ГЭС до Коприно весьма прост и представляет собой затопленное русло Волги. Только в районе Коприно и севернее он приобретает более сложный характер, имеет изломы дна в местах затопленных рек и ручьев и на их водоразделах.

В затопленном русле Мологи от границы выклинивания подпора по мере воды глубины постепенно увеличиваются. От сел. Харламовского до расширенной части водохранилища они колеблются от 6 до 14 м. Наибольшие глубины на Мологе, как и на Волге, наблюдаются в пределах открытой части водохранилища: от Первомайских островов до пос. Брейтова до 18 м, а с приближением к бывшему устью Мологи до 25 м и более. От

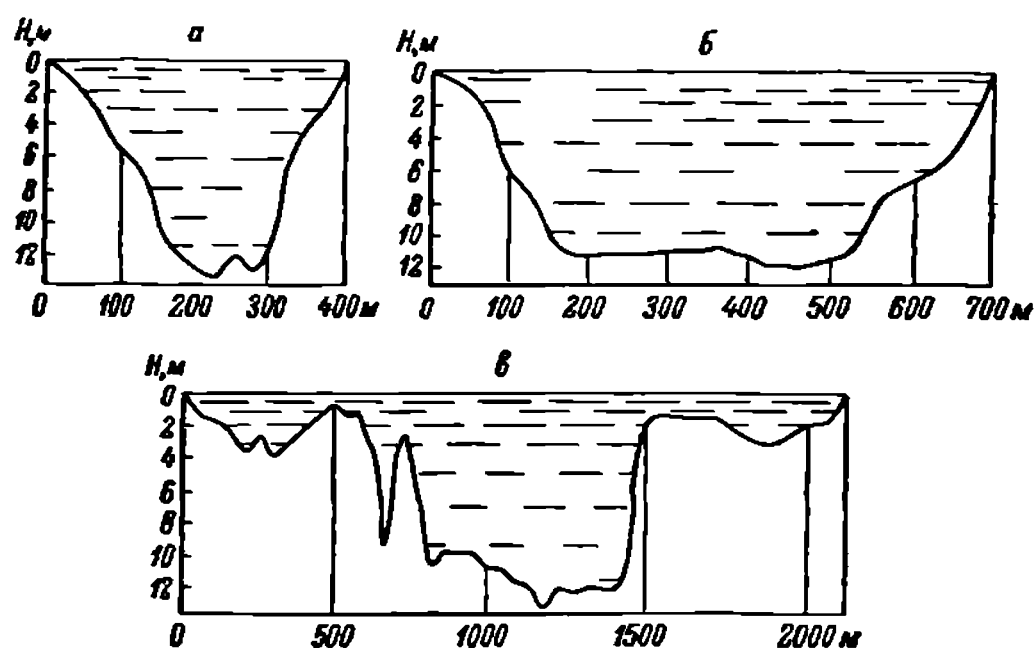


Рис. 14. Поперечный профиль дна Рыбинского водохранилища.

а — пос. Мышкино; б — дер. Юрьино; в — сел. Коприно.

носительные большие глубины по затопленному руслу Мологи встречаются в отдельных ямах и не представляют собой сплошного понижения рельефа. Для Мологи в отличие от Волги и Шексны характерно резко колебание глубин даже по руслу. В приустьевом участке Мологи иногда рядом встречаются глубины 18 и 30 м, а в районе Брейтова рядом можно наблюдать глубины 6 и 18 м. Сложен рельеф дна и на залитой низине левобережья Мологи, что хорошо видно по профилю дна на разрезе от Первомайских островов до Центрального мыса (рис. 15, а). Русло Мологи в этом районе неширокое, с очень крутыми склонами и отдельными повышениями дна. На протяжении 12 км от русла в сторону Центрального мыса рельеф дна имеет неровный характер. Встречаются резкие повышения и понижения дна, причем некоторые из них достигают 5—6 м. Только с приближением к Центральному мысу рельеф дна постепенно выравнивается и на фоне общего уменьшения глубин наблюдаются лишь отдельные небольшие переломы.

Распределение глубин по затопленному руслу Шексны имеет много общего с Мологой. Уменьшаясь от 14 м у Череповца до 10 м в районе бывшего устья Суды, с выходом в открытую часть водохранилища глубины постепенно возрастают и достигают максимальных значений на приплотинном участке ГЭС. Наиболее резкие изменения глубин по длине русла прослеживаются в южной части шекснинской низины где на протяжении нескольких десятков километров от плотины они колеблются от 20 до 30 м. Так же как и на Мологе, большие глубины занимают незначительные

участки дна и располагаются в виде омутов. В одном из шекснинских омутов отмечена и максимальная глубина водохранилища которая равняется 30.4 м (Фортунов, 1959). Русло Шексны в пределах водохранилища на отдельных участках имело большую извилистость и после залития здесь оказался особенно сложный рельеф дна. Это хорошо видно на рис. 15, б, где представлен профиль дна водохранилища в районе северной границы Молого-Шекснинской низины. На профиле дна по разрезу Копорье—Шуйга отчетливо выделяются пять глубоких, мало отличающихся по форме впадин с крутыми склонами одинаковой глубины и незначительными различиями по ширине. Сходство в их конфигурации позволяет сделать предположение, что они есть не что иное, как затопленное русло Шексны, обладающее значительной извилистостью на данном участке

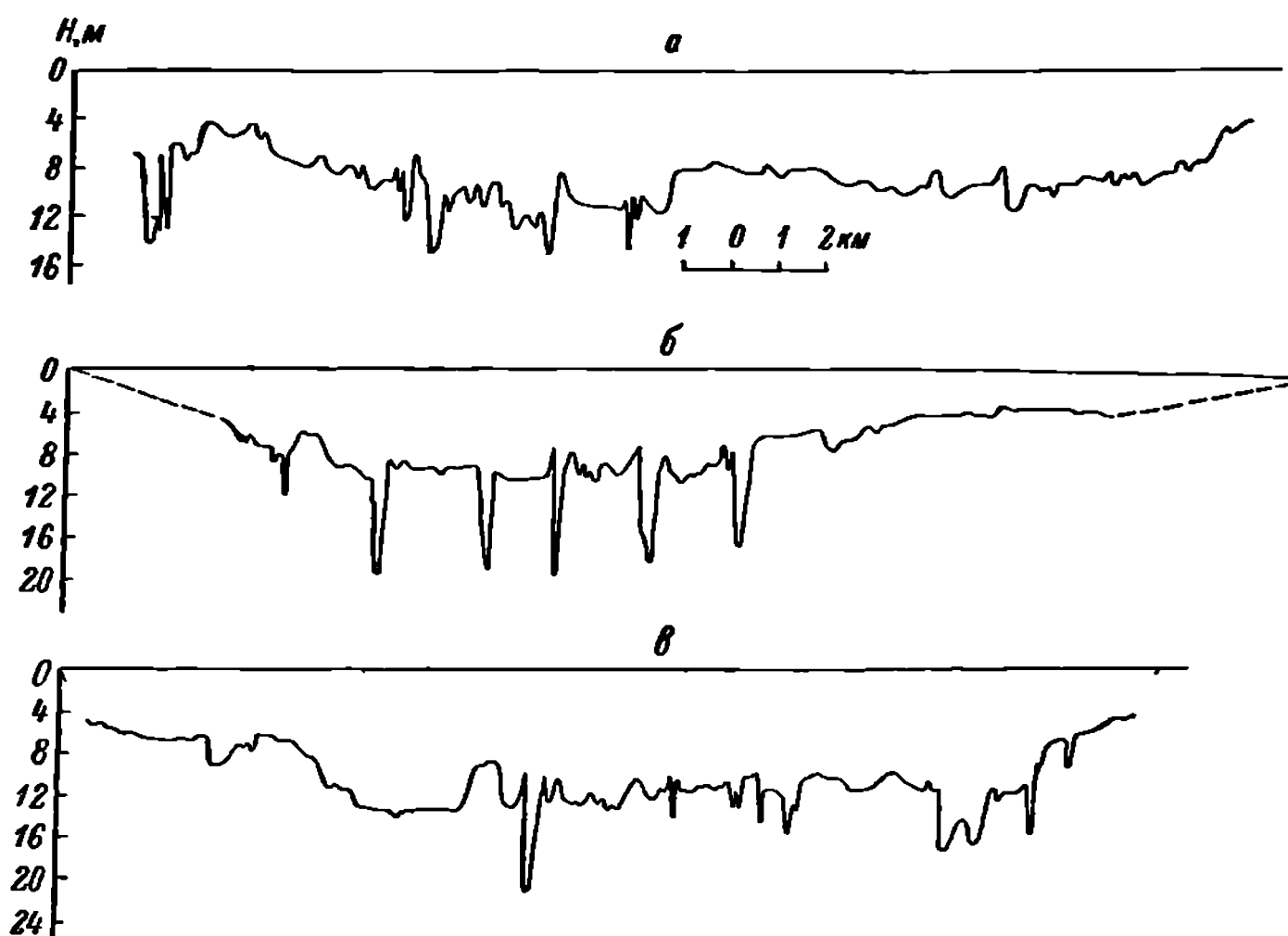


Рис. 15, Поперечный профиль дна Рыбинского водохранилища по разрезам.
 а — Первомайские острова—мыс Центральный б — бывшее сел. Копорье—сел. Гаютино
 в — мыс Центральный—Бабинские острова.

Рельеф дна в открытой части водохранилища значительно сложнее, чем на речных участках, так как кроме рек здесь оказались затопленными и котловины озер, русла ручьев и оврагов, создающие в комплексе многочисленные изломы. По своим размерам неровности рельефа дна очень различны. Иногда это резкое и небольшое поднятие или опускание дна, а в отдельных случаях обширные понижения также с большими неровностями дна. Такой сложный рельеф дна водохранилища наблюдается по разрезу Копорье—Бабинские острова (рис. 15, в). Разрез пересекает шекснинский поток на выходе его в расширенную часть водохранилища в юго-восточном направлении. В этом районе рельеф дна водоема очень сложен. В северо-западной части разреза хорошо прослеживаются два значительных понижения дна. Первое из них соответствует затопленному руслу р. Шуйги, правобережному притоку Шексны, впадающему в нее на расстоянии 95 км от устья. Максимальная глубина этого понижения достигает 14.3 м. Далее по разрезу, между Шуйгой и Шексой где глубины уменьшаются до 7—8 м, наблюдается второе понижение дна,

которое представляет собой русло Шексны. Склоны шекснинского русла очень крутые, а наибольшая глубина достигает 22 м. На протяжении

11—12 км левобережной поймы Шексны рельеф дна более сглаженный, преобладают глубины 10—12 м, но с приближением к восточному берегу водохранилища снова наблюдается значительное понижение дна в районе Глухой Шексны, которая представляет собой рукав Шексны, расположенный примерно в 87 км от устья. На протяжении около 3 км по разрезу глубины в этом понижении колеблются от 12 до 17 м.

Рельеф дна наиболее широкой части водохранилища изображен на профиле (рис. 16, а) и представляет собой очень сложную картину, особенно в моложской части разреза. Пойменные участки Мологи с многочисленными озерами и старицами делают его таким пересеченным, что на эхограмме трудно определить даже местоположение русла Мологи. Глубины водохранилища в этом районе резко меняются — от 6.5 м на пойме до 20 м и более в русле Мологи. Русло Мологи очень извилисто, иногда на одном километре оно пересекается разрезом дважды. С приближением к водоразделу с Шексней дно водохранилища постепенно повышается и становится более ровным, но и в междуречье отчетливо прослеживаются многочисленные

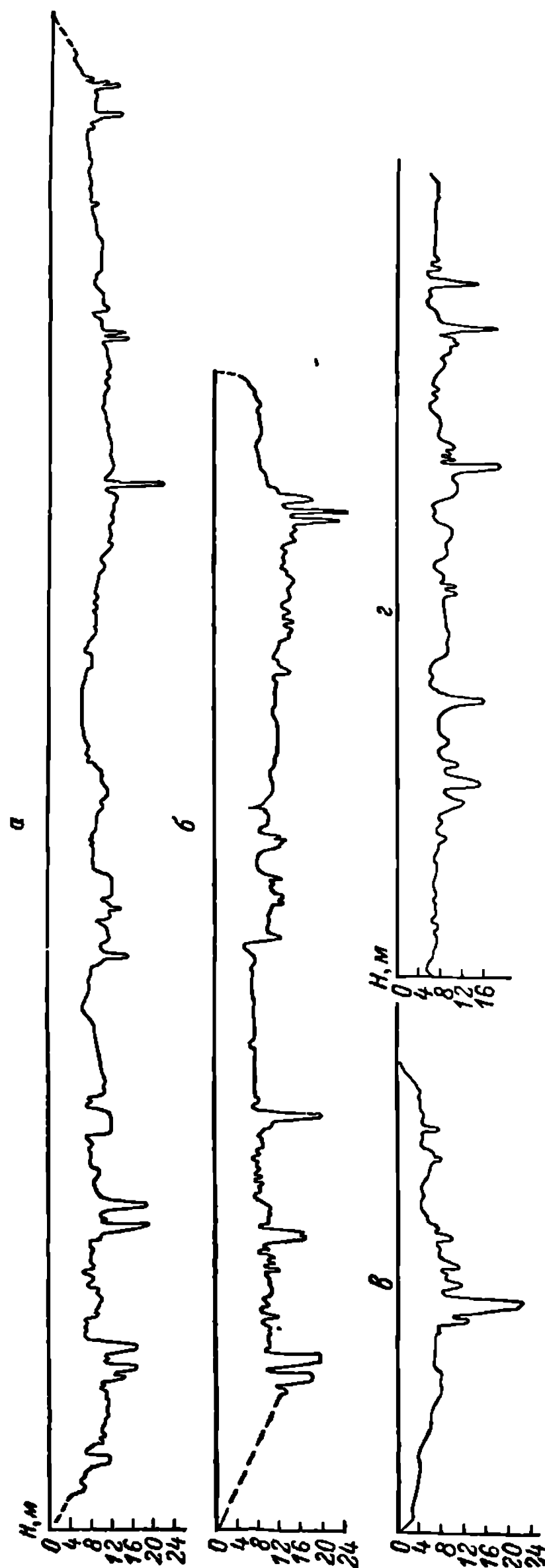


Рис. 16. Поперечный профиль дна Рыбинского водохранилища по разрезам.

а — бывшее сел. Леонтьевское—дер. Колобово; б — бывшее сел. Горькая Соль дер. Григорово; в — мыс Рожновский дер. Милошино; з — мыс Центральный мыс Рожновский.

котловины озер и другие понижения и рельефе. Так, на левобережье Мологи, примерно в 2.5 км от русла, расположена котло

вина озера с глубинами порядка 12 м и протяженностью свыше 1 км. Примерно на середине разреза находятся затопленные озера Шагрово и Трестчик. Максимальная глубина в первом из них 15.7 м, а во втором — 12 м. С приближением к оси водораздела глубины уменьшаются до 6 м. В восточной половине разреза рельеф дна более спокойный. В направлении к руслу Шексны глубины при незначительных повышениях и понижениях дна систематически увеличиваются и непосредственно в русле достигают 22.5 м. Наиболее значительные понижения дна у восточного берега водохранилища отмечаются в затопленном русле Согожи.

Так же сложен рельеф дна водохранилища и в южной части междуречья. Это хорошо видно на рис. 16, б, где представлен профиль дна по разрезу от бывшего сел. Горькая Соль до дер. Григорово на восточном берегу водохранилища. В западной части водохранилища наиболее крупные понижения дна приурочены к руслу Мологи, которое вследствие большой извилистости трижды пересекается разрезом. Максимальные глубины в нем не превышают 20 м. Рельеф дна в излучинах Мологи неровный, имеются небольшие, но многочисленные повышения и понижения дна с преобладающими глубинами 8—10 м. В междуречье Мологи и Пущмы дно водохранилища ровное и глубины практически постоянные (около 7 м), но с выходом в затопленное русло Пущмы они увеличиваются до 14—15 м. Относительно ровный рельеф дна с постепенным понижением к Шексне отмечается между Пущмой и Шексней. Глубины на этом участке разреза колеблются около 10 м, а с приближением к руслу Шексны увеличиваются до 13 м. Русло Шексны и в этом районе очень извилисто. Максимальная глубина в одной из таких излучин достигает 24.5 м. С выходом на левобережную пойму Шексны рельеф дна становится более сглаженным и после пересечения затопленного русла Ухры глубины постепенно уменьшаются.

Шекснинский участок водохранилища перед Рыбинской ГЭС представляет собой своего рода подводный канал, по которому происходит основной сброс воды. В этом районе Шексна выходит за пределы Молого-Шекснинской низины и долина ее в направлении к плотине сужается, а рельеф дна становится обычным для затопленной долины реки (рис. 16, в). Максимальные глубины приурочены к руслу Шексны и достигают более 20 м. Склоны русла Шексны крутые, а залитая пойма и первая надпойменная терраса имеют плавный и относительно равномерный уклон, соответствующий падению реки (Москвитин, 1947).

Существенное значение для водообмена между западной и восточной частями водохранилища имеет рельеф дна по Молого-Шекснинскому водоразделу. Рельеф дна в этом районе представлен на разрезе от Центрального мыса к Рожновскому (рис. 16, г). Направление разреза несколько не совпадает с направлением оси водораздела и проходит к западу от нее. На эхограмме разреза видно, что на протяжении 4 км от Центрального мыса дно водохранилища относительно ровное и глубины практически не меняются. Далее характер рельефа резко изменится: значительные понижения дна чередуются с повышениями, причем если впадины различны по величине и форме, то повышения дна, как правило, ограничиваются изобатой 8 м. Наибольшие глубины на данном разрезе отмечаются в затопленном русле Мыли, где они достигают 16.7 м. До затопления междуречья по долинам небольших рек Мыли и Шуйги во время половодья вода поступала из Мологи в Шексню и наоборот. Водораздел между этими реками представлял собой заболоченную равнину с большим количеством мелких озер. Вполне вероятно, что отмеченные понижения дна являются небольшими затопленными озерами. На профиле четко прослеживается русло Мологи, наибольшая глубина в котором равняется 20 м. Ближе к Рожновскому мысу наблюдается понижение дна в районе затопленного русла Пущмы. Ширина русла Пущмы составляла 20—40 м, а ширина

ее долины достигала 2 км. От Пушмы в направлении Рожновского мыса рельеф дна относительно ровный и глубины колеблются около 8 м.

Таким образом, в результате затопления не только русловых и пойменных участков рек, но и частично коревных склонов долин Волги, Мологи и Шексны, а также значительной части Молого-Шекснинского водораздела, рельеф дна Рыбинского водохранилища сильно осложнился. По рельефу дна этот водоем стал существенно отличаться не только от озер, но и от других водохранилищ.

Грунтовый комплекс Рыбинского водохранилища определяется прежде всего геоморфологией и почвенным покровом территории, послужившей ему ложем. Большая часть водохранилища расположена в Молого-Шекснинской низине, которая в геоморфологическом отношении является древней эрозионной впадиной. Во время отступления ледника в ней образовался озерный водоем, частично заполненный аллювиально-озерными отложениями, верхние горизонты которых представлены тонкими слоистыми песками желтого цвета с розовым оттенком (Мирчинк, 1935). В более позднее время ложе озера стало речной долиной с хорошо развитой речной сетью, отложившей более молодой аллювий, который по своему составу, однако, близок к древнему. Отложения древнего аллювия на территории, залитой водохранилищем, располагаются выше изобаты 10 м от НПУ, а современного аллювия — ниже этой изобаты (Чижиков, 1928). Почвенный покров в зоне затопления представлен в основном песчаными, супесчаными, подзолистыми, подзолисто-глееными, торфянисто-подзолистыми почвами и торфяниками (Афанасьева, 1940). Распределение почвенного покрова между различными угодьями на залитой части Молого-Шекснинской низины дано в табл. 19 (Антипова, 1961).

Т а б л и ц а 19

Площадь залитых угодий (в % от площади водохранилища)

Пашня	Луг	Выгон	Населенные пункты	Лес	Кустарник	Речи, озера
11.8	18.5	8.1	1.5	53.1	2.8	4.2

Началом формирования грунтов Рыбинского водохранилища следует считать время его заполнения. Первые сведения о донных отложениях этого водоема имеются в работах Д. Д. Кудрянцева (1950б), И. Ф. Овчинникова (1950) и Ф. Д. Мордухай-Болтовского (1955). Более полную характеристику основных типов грунтов водохранилища и их распределение по акватории водоема дает В. П. Курдин (1959, 1960, 1961).

Общая схема распределения грунтов водохранилища показана на рис. 17, из которого видно, что грунтовый комплекс водохранилища представляет собой очень пеструю картину. На значительной части ложа до настоящего времени сохранились первичные грунты, представляющие собой залитые почвы. Образование новых, вторичных отложений идет медленно. Так, в затопленных долинах Волги, Мологи и Шексны до выхода их в Молого-Шекснинскую низину вторичные грунты встречаются лишь на глубинах от 6 до 8 м в виде серых илов¹ и на глубинах свыше 8 м в виде песчанистых илов, а значительные площади занимают первичные грунты. В восточной части Молого-Шекснинской низины из вторичных грунтов преобладают торфянистые илы, а в западной — серые илы. Торфянистые илы по Шексне располагаются преимущественно ниже изобаты 10 м. Исключение составляют лишь два небольших участка у всплывших торфяников вблизи

¹ Классификация грунтов — по В. П. Курдину (1959).

Центрального мыса и к северо-востоку от него, где они залегают на глубине 4—7 м (Курдин, 1959). Пески в этой части водохранилища встречаются обычно до глубины 5—6 м, а у восточного берега, подверженного сильному воздействию волн при отсутствии в прибрежной полосе остатков древесной

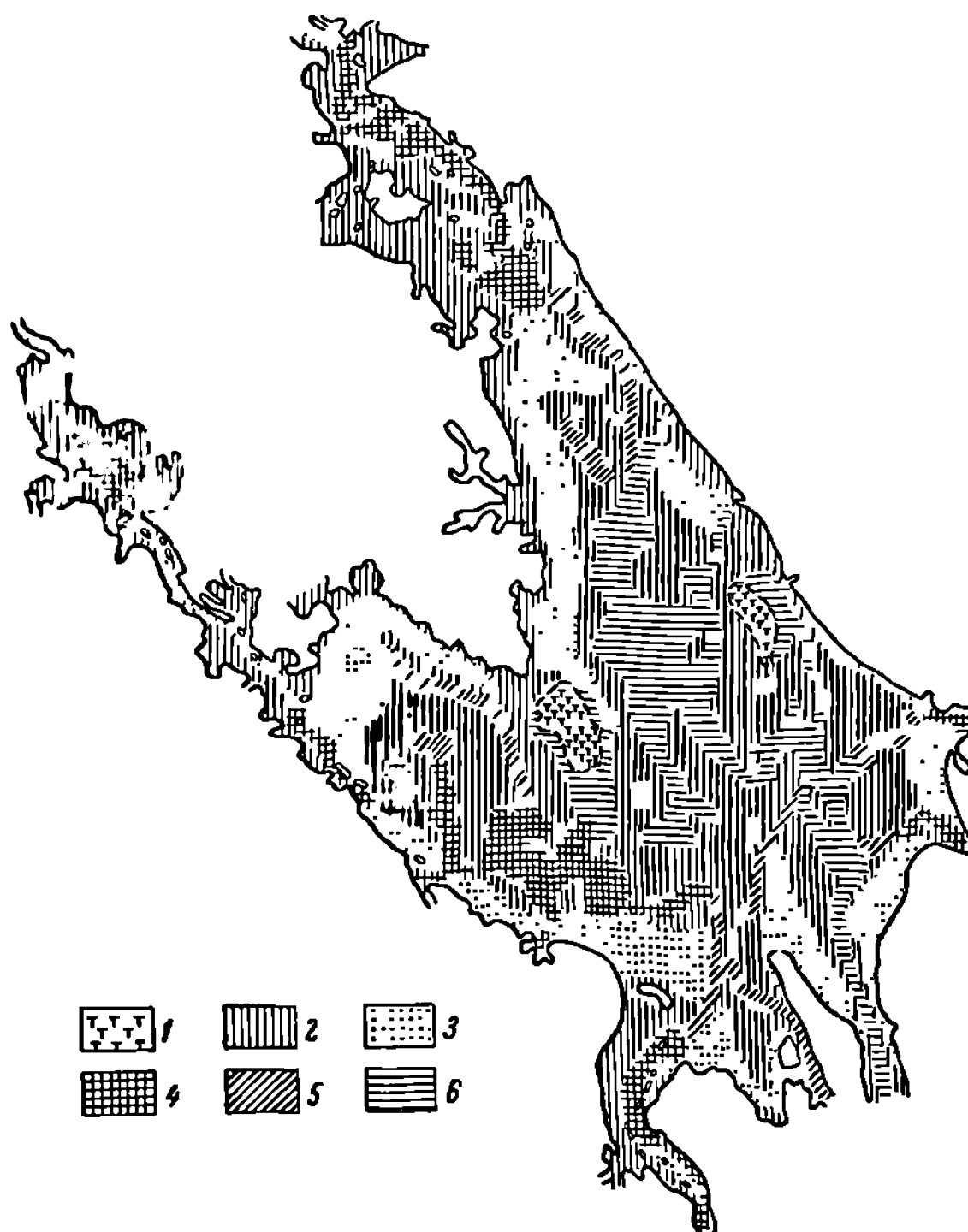


Рис. 17. Схема распределения грунтов Рыбинского водохранилища (по В. П. Курдину, 1959).

1 — всплывшие торфяники; 2 — почвы; 3 — песок и илистый песок; 4 — песчаный серый и серый ил; 5 — переходный ил; 6 — торфянистый ил.

растительности, они начинаются от уреза воды. Такое же распределение песков наблюдается и в моложской части низины. Источниками образования вторичных грунтов в водохранилище являются аллювиальные наносы, поступающие с водосбора, продукты размыва берегов и ложа, размывы торфяники, остатки наземной растительности, покрывавшей затопленную территорию, а также водной фауны и флоры. Степень участия каждого из этих источников в грунтообразовании по районам водохранилища различна (таблицы 20 и 21).

Формирование грунтового комплекса водохранилища еще не закончено. Основным препятствием для интенсивной переработки первичных грунтов являются сильная задернованность значительных участков ложа, а также затопленные леса и кустарники, которые разбивают волну задолго до подхода ее к линии уреза воды и тем самым предохраняют береговую зону от разрушения. Несмотря на это, первичные грунты со временем полностью выпадут из грунтового комплекса водоема, а с прекращением вымывания

Характеристики грунтов (в % от сухого веса) Рыбинского водохранилища
(по В. П. Курдину, 1959)

Грунт	Максимальная молекулярная влагоемкость	Потеря в весе при прокаливании	Общее органическое вещество по мокрому сжиганию	Лигнино-гумусовый комплекс
Первичный грунт				
Супесчаная почва	21.0	7.7	5.6	4.7
Торф	54.5	80.0	82.0	78.0
Вторичный грунт				
Пылеватый песок	5.0	0.5	0.3	—
Песчанистый серый ил	18.8	7.1	5.9	3.9
Серый ил	24.0	12.6	10.5	8.3
Переходный ил . .	36.9	30.6	30.3	21.4
Торфянистый ил	61.0	62.4	65.1	50.8

торфяников постепенно исчезнут торфянистые илы. Наиболее вероятно, что их заменят серые илы. Пески и серые илы станут преобладающими в грунтовом комплексе водохранилища.

В формировании грунтового комплекса Рыбинского водохранилища существенную роль играют процессы осадконакопления, так как одним

Т а б л и ц а 21
Площадь (в % от общей),
занятая различными грунтами
(по В. П. Курдину, 1959)

Грунт	Площадь
Незапленные почвы	55
Пески и илистые пески	20
Песчанистые серые и серые илы	8
Переходный ил	4
Торфянистый ил	13
Отложения из макрофитов . . .	< 1

из источников образования грунтов являются водные взвеси. Источниками водных взвесей в водохранилище служат сток взвешенных наносов, размыв берегов и дна водоема, развитие планктона, разложение прибрежно-водной растительности, физико-химические процессы и эоловые выносы. При этом доля взвешенных наносов, приносимых реками, наиболее велика. По подсчетам Н. А. Зиминской (1963), годовой многолетний сток взвесей крупных рек бассейна водохранилища выражается следующими цифрами: Волга —

103, Молога — 45, Шексна — 206 тыс. т. Принимая мутность остальных рек бассейна близкой к мутности воды Верхней Волги и Мологи, Н. А. Зиминская оценивает сток взвешенных наносов остальных притоков водохранилища в 120 тыс. т. Следовательно, с речным стоком в водохранилище ежегодно поступает около 420 тыс. т взвешенных наносов. В самом водохранилище это количество взвесей заметно увеличивается за счет планктона, который ежегодно дает около 70 тыс. т взвесей.

Следовательно, эти два источника доставляют в водохранилище около полумиллиона тонн взвесей в год, но при этом не учитывается поступление взвесей от размыва берегов и мелководий. Как известно, в результате размыва берегов и мелководий, особенно интенсивном на первой стадии существования водохранилища, в водоем поступает большое количество взвесей. Об этом свидетельствует средняя годовая величина аккумуляции взвесей за двадцатилетний период, определенная по мощности донных отложений и в пересчете на сухое вещество составившая 2.6 млн т (Трифонов 1963). Такое различие в величине годовой аккумуляции взвесей указы-

вает прежде всего на то, что за прошедшие 20 лет основным источником образования грунтов водохранилища являлись местные материалы и прежде всего продукты размыва берегов, ложа водохранилища и всплывших торфяников. Об этом свидетельствует и мощность иловых отложений, средняя величина которой для торфянистых и переходных илов, по Н. А. Трифоновой, равна 13 см, а мощность илстых песков, песчанистых и серых илов, образующихся в основном из аллювиальных наносов, колеблется от 3.9 до 7.0 см.

Распределение вторичных отложений в водохранилище представляет довольно пеструю картину. На одних участках мощность их достигает 1 м и более, а на других — не превышает нескольких миллиметров. Годовая аккумуляция взвесей, рассчитанная в среднем на всю площадь водохранилища, составляет 0.15 см (Трифорова, 1963).

Таким образом, водные взвеси водохранилища представляют важный источник грунтообразующего материала и процессы осадконакопления играют существенную роль в формировании грунтового комплекса водоема.

Горьковское водохранилище по характеру распределения глубин и рельефу дна заметно отличается от Рыбинского. На речном участке его сохранились крупные формы рельефа и поэтому глубины здесь сильно меняются: от 3—6 м у Рыбинска до 12—17 м ниже Кивешмы. Характерной особенностью данного участка является резкое изменение глубин в связи с колебаниями уровня, обусловленными попусками Рыбинской ГЭС.

Весьма разнообразны глубины водохранилища ниже устья Унжи. На севере расширенного участка водоема они значительно меньше, чем на юге. В южном направлении глубины возрастают и в русловой части водоема вблизи плотины достигают максимальных значений.

О распределении глубин в озерной части водохранилища при НПУ дает представление карта-схема, приведенная на рис. 18. Наибольшие глубины располагаются узкой полосой вдоль всего водохранилища в надрусловой части, где они достигают 15—20 м. Глубины над бывшей поймой и первой надпойменной террасой в приплотинной части водохранилища составляют 9—12 м. По мере удаления от плотины глубины на пойме постепенно уменьшаются и у г. Пучежа не превышают 6—8 м, а в юрье-вском расширении — 3—5 м. Южнее Пучежа обширные мелководья отсутствуют, а вдоль обоих преимущественно обрывистых абразионных берегов узкой полосой в несколько десятков метров тянутся пологие склоны.

Рельеф дна Горьковского водохранилища в еще большей степени, чем Рыбинского, свидетельствует о том, что это затопленная суша, основные формы рельефа которой сохранились до настоящего времени. Это особенно справедливо в отношении озерной части водоема. В ее районе рельеф поймы и первой надпойменной террасы долины Волги был гривисто-ложбинный, с многочисленными озерами, старицами и заболоченными низинами (Белавская и Павлова, 1961), что обусловило и сложность рельефа дна водохранилища.

На рис. 19 представлен профиль дна по разрезу водоема у южной окраины г. Чкаловска. В этом районе оба берега водохранилища высокие, причем западный значительно выше восточного. У этого берега четко прослеживается русло реч. Санохты. Наибольшие глубины по разрезу приурочены к бывшему руслу Волги. Левобережная часть водоема в этом районе мелководная, с большим разнообразием биотопов. На профиле ее дна отчетливо выделяется ряд впадин, мало отличающихся по глубине и представляющих те или иные затопленные формы рельефа суши. Так, недалеко от русла Волги расположена небольшая впадина относительно правильной формы, которая является затопленным оз. Рахмановским. От нее к восточному берегу водоема по разрезу отмечается ряд других

неровностей рельефа. Наиболее крупная из них представляет собой бывшее русло притеррасной речки с крутыми склонами и глубиной около 9 м.

Значительно проще рельеф дна водохранилища у г. Пучежа (рис. 20, см. вкл. стр. 48—49). Здесь, так же как и у г. Чкаловска, особенно рез-

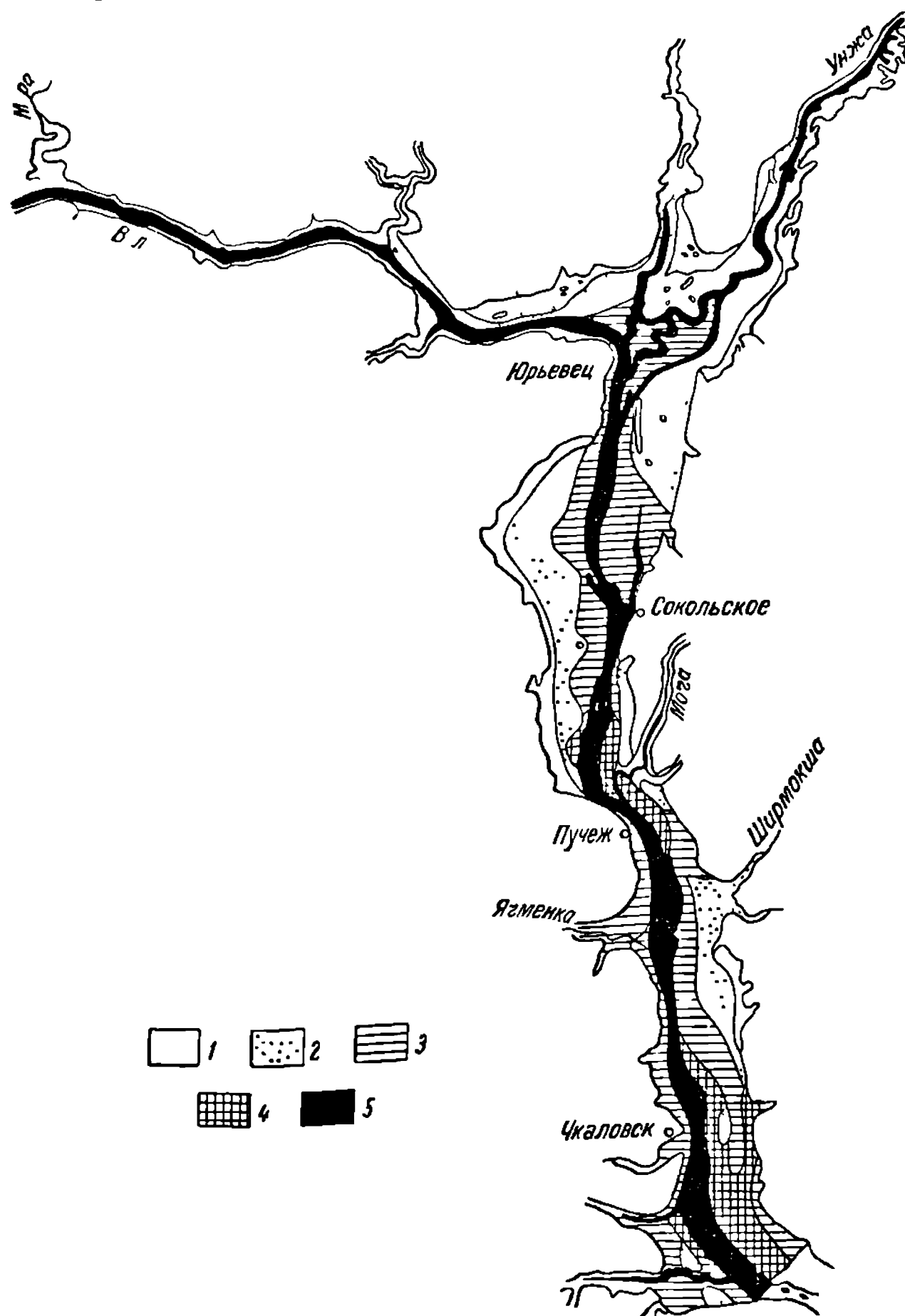


Рис. 18. Распределение глубин в озерной части Горьковского водохранилища (по К. К. Эдельштейну, 1958).

1 — менее 2 м; 2 — 2—5 м; 3 — 5—10 м; 4 — более 10 м; 5 — русла рек.

кие изменения рельефа дна наблюдаются у западного берега и хорошо прослеживается русло Волги. С выходом на затопленное левобережье рельеф дна становится более ровным. Наиболее существенное понижение отмечается в небольшом притеррасном озере у восточного берега водоема.

В районе г. Юрьевца, где водохранилище имеет наибольшую ширину (рис. 21, см. вкл. стр. 48—49), от высокого и обрывистого западного берега

глубины быстро увеличиваются в направлении к руслу Волги, а оно в этом районе шире, чем у Пучежа. Левобережная пойма Волги имеет весьма сложный рельеф: примерно на середине ее поднятие столь значительно, что образуется остров. Между островом и восточным берегом водоема имеется и ряд других повышений дна, одно из которых при сработке водохранилища оказывается над водной поверхностью.

Более мелкие формы рельефа дна в расширенной части Горьковского водохранилища видны на эхограммах ряда разрезов (рис. 22). Как следует из них, Горьковское водохранилище имеет такой же сложный рельеф дна, как и Рыбинское. Однако основные формы рельефа затопленной территории обусловили существенные различия в морфометрии этих водоемов. В Горьковском водохранилище более существенны морфометрические особенности отдельных участков и в связи с этим в нем по-иному протекают некоторые гидрологические процессы, в частности формирование грунтов.

Грунты Горьковского водохранилища изучены слабо и в настоящее время можно говорить лишь о характере грунтового комплекса и основных особенностях распределения отложений. Грунты речной части водоема представляют собой крупно- и среднезернистый песок, до Костромы почти совершенно не заиленный. Ниже Костромы песок слегка заилен и имеет серый и темно-серый цвет, а от Кинешмы на песчаных русловых отложениях появляется тонкий слой наилка из темно-серого полужидкого песчанистого ила толщиной около 1 см (Эдельштейн, 1968). Такой характер грунта сохраняется на всем протяжении затопленного русла Волги вплоть до плотины Горьковской ГЭС, причем мощность слоя песчанистого и серого ила колеблется от 1 до 10 см (табл. 22).

На большинстве затопленных пойменных участков озерной части водоема слой песчанистого ила, покрывающий дерновину или разбухшие почвы, колеблется от нескольких мил-

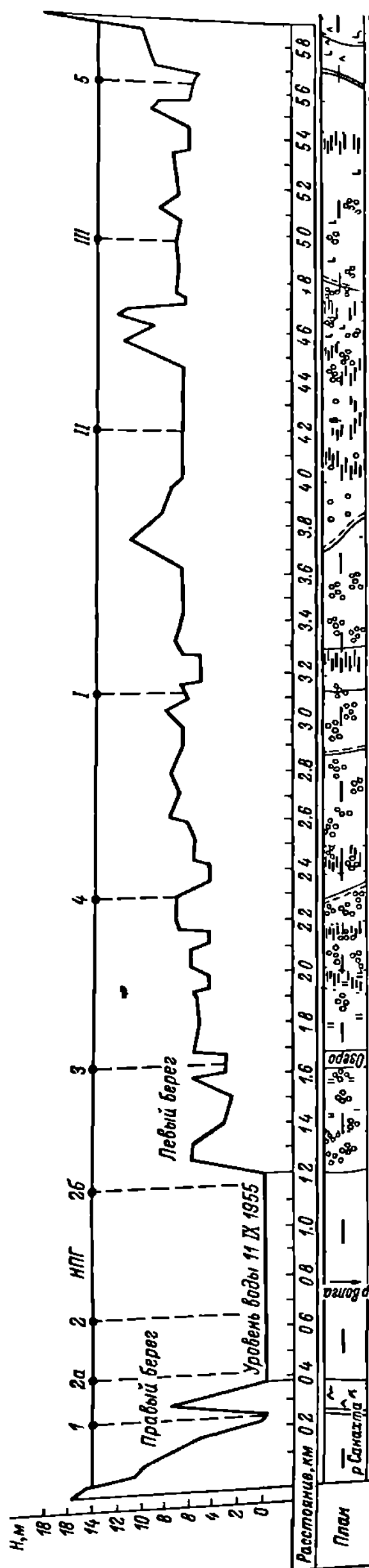


Рис. 19. Поперечный профиль дна Горьковского водохранилища на чкаловском створе. Арабские цифры — номера комплексных станций; римские цифры — номера бентосных станций.

Характер и механический состав грунта (в % от сухого веса)
на русловом участке Горьковского водохранилища
(по К. К. Эдельштейну, 1968)

Положение станций	Глубина, м	Грунт	Фракции, мм						Потери в весе при прокаливании, %
			более 0,2	0,2 - 0,1	0,1 - 0,05	0,05 - 0,01	0,01		
У Рыбинска	7,8	Средний песок	0,8	71,7	4,0	0,5	20,5	2,5	0,64
У Ярославля	6,5	»	35,3	58,0	4,5	1,5	Слезы	0,5	0,54
У Кинешмы	13,0	Песчаный ил	15,5	35,8	9,2	11,2	13,8	14,5	5,11
У Юрьевца	15,0	, ,	16,8	11,8	5,2	12,7	28,0	25,5	8,82
У Пучежа	19,4	, ,	1,5	5,5	13,2	33,3	25,5	21,0	3,96
У Чкаловска	17,9	Серый ил	0,1	2,0	6,0	43,5	16,5	31,3	4,21

лиметров до 4—6 см. Иногда вместо него дерновина покрыта слоем мелкозернистого песка. Более интенсивно процесс заиления идет в нижних участках приустьевых заливов и примыкающих к ним районах. Так,

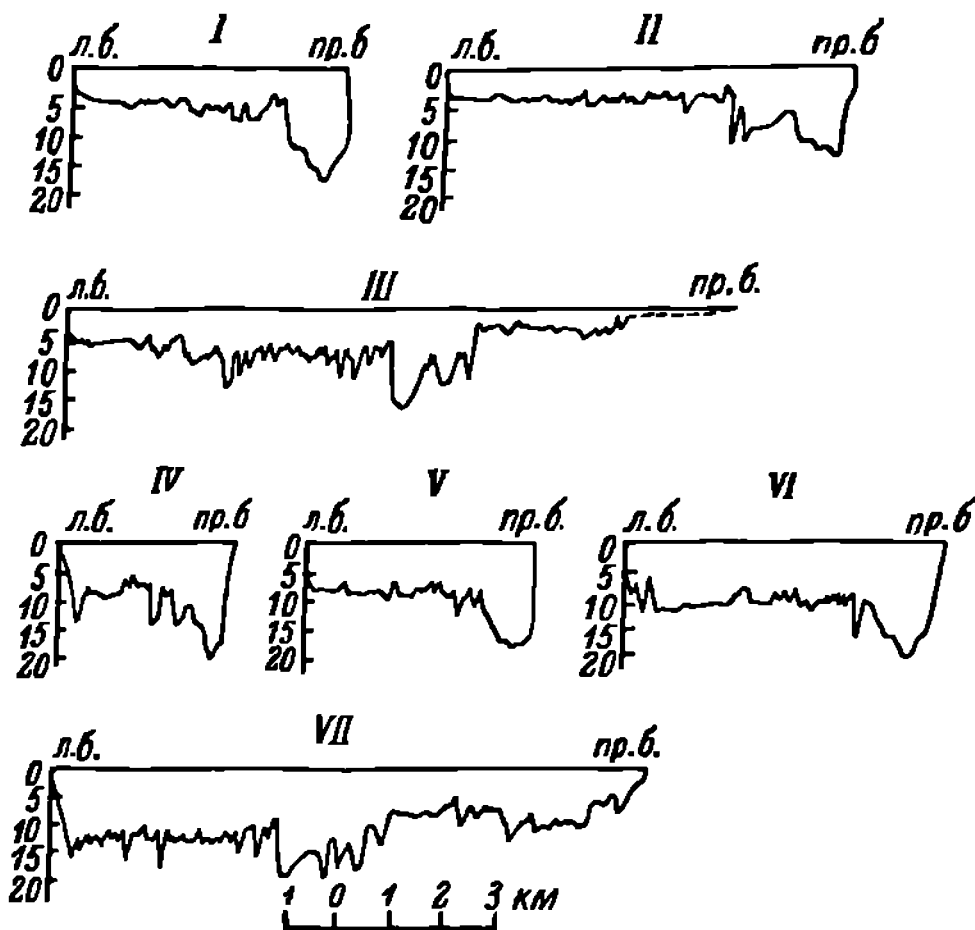


Рис. 22. Поперечный профиль дна озерной части Горьковского водохранилища (по К. К. Эдельштейну 1958).

I — у дер. Завражье; II — у г. Юрьевца; III — севернее сел. Сокольского; IV — у г. Пучежа; V — севернее дер. Катунки; VI — у г. Чкаловска; VII — верхний бьеф Горьковской ГЭС.

в зал. Немды, у сел. Сорочково и дер. Завражье, толщина слоя серого песчанистого ила достигает 11—21 см, в бывшем русле Унжи, в районе Исаковских островов, — 12—16 см, в низовьях залива по р. Мере — 15—22 см. Верхний 4—6-сантиметровый слой обычно представлен светло-серым или оливковым полужидким илом, ниже которого залегает серый песчанистый ил. Выше по заливам мощность наилка быстро уменьшается, и в их верховьях грунты представлены разнотернистыми песками речного аллювия.

В формировании грунтового комплекса Горьковского водохранилища, так же как и Рыбинского, существенную роль играют водные взвеси. Уже во время наполнения водохранилища величина мутности воды, особенно в широкой части его, заметно изменилась. В зоне распространения подпора она значительно понизилась по сравнению с мутностью реки в естественных условиях (табл. 23).

Т а б л и ц а 23

Средняя мутность воды (в г м³) у Кинешмы

Дата	Мутность	Дата	Мутность
1951 г. 27 VI 23 VII	21.4 26.1	1956 г. 30 VI 14 VII	5.1 3.0

Процесс формирования берегов протекает наиболее интенсивно в озерной части водохранилища (Шугар, 1959; Иконников, 1959; Ярославцев, 1961). Общая длина ее береговой линии составляет 240 км, две трети из которых приходится на долю берегов абразионного типа. Они представляют собой почти отвесные обрывы (угол откоса до 75—85) высотой 10—15 м и более, образовавшиеся в результате подмыва, обрушений и осыпей песчано-глинистых пород. При незначительных колебаниях уровня в навигационный период у подножья береговых обрывов происходит быстрое образование береговой отмели, уменьшающей темп дальнейшей переработки берегов. По данным А. К. Шугара (1959), ширина отмели у глинистых берегов составляет 5—10 м с уклоном 5—8 , а у песчаных — 20—30 м с уклоном 1.5—3°. Процесс переформирования берегов влечет за собой выравнивание береговой черты и оказывает существенное влияние на формирование грунтового комплекса водоема.

Глава II

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ВОДОХРАНИЛИЩАХ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА

Изложение таких обширных и сложных вопросов, как гидрологические процессы, формирование, распределение и динамика водных масс в столь своеобразных водных объектах, какими являются волжские водохранилища, требует особого внимания к форме и порядку рассмотрения материалов. Предварительное знакомство с многочисленными и разнообразными материалами комплексных экспедиций и маршрутных обследований, а также скоростных и синхронных съемок с учетом непостоянства режима и большой неоднородности вод водохранилищ дает основание считать, что в данном случае наиболее целесообразно рассмотреть эти вопросы обстоятельно и широко на примере двух морфометрически различных водоемов. Ограниченное число объектов позволит более глубоко, с учетом конкретных особенностей изучить гидрологические процессы в них и в дальнейшем распространить выявленные закономерности на другие, подобные им водохранилища.

Предварительные исследования показали, что для этих целей наиболее подходящими водоемами могут быть Рыбинское и Горьковское водохранилища. Первое из них по размерам и конфигурации напоминает озеро, тогда как второе является типичным долинным водохранилищем. Различаются они и по характеру регулирования стока. Рыбинское водохранилище производит годичное регулирование стока, а Горьковское, как и большинство волжских водохранилищ, — сезонное.

В работе весьма подробно рассматриваются физико-географические условия, морфометрические особенности и отдельные элементы гидрологического режима именно этих водохранилищ, тогда как в отношении остальных волжских водохранилищ приводятся только характерные особенности того или иного гидрологического процесса.

Водный баланс водохранилищ

Водный баланс является одним из основных факторов, обуславливающих динамику водных масс и трофику водоема. В связи с этим рассмотрение особенностей гидрологических процессов в водохранилищах волжского каскада целесообразно начать с основных составляющих водного баланса, а затем можно перейти к характеристике колебаний уровня, волновых процессов, течений и температурных условий.

Наполнение и питание волжских водохранилищ осуществляется за счет стока Волги и боковых притоков. Естественно, по объему годового стока на первом месте стоит Волга. Так, в самое верхнее из каскада водохранилищ — Ивановское — она доставляет 56.6% общего притока (рис. 23), а вместе со стоком Тверды, которая впадает в Волгу выше выклинивания подпора и не образует в водохранилище самостоятельной водной массы, это число увеличивается до 82%.

В расходной части водного баланса Иваньковского водохранилища преобладает суммарный сброс воды через гидроузел. Он составляет 84.5% от суммы общего расхода и включает использование воды на работу агрегатов ГЭС, сбросы ее через водосливную плотину и донные отверстия, а также расходы воды на шлюзования. Второй по величине составляющей расходной части водного баланса является забор воды в канал им. Москвы (9%). Представление об остальных компонентах водного баланса Иваньковского водохранилища можно получить из табл. 24 и 25.

Естественно, что как приток, так и расход воды в Иваньковском водохранилище из года в год колеблется в широких пределах. Так, по данным Н. А. Зиминовой (1959), величина притока в 1951 г. равнялась 8.16 км³, а в 1953 г. — 16.09 км³. Неравномерно и внутригодовое распределение приточности. Наибольшее количество воды поступает в водохранилище в период весеннего половодья и осенью, а наименьшее — летом и зимой (табл. 26). В соответствии с этим идет и расход ее; большая часть сбросов производится весной и во время осенних паводков (41 и 22% годового объема сбросов), а наименьшая — в летне-осеннюю межень (рис. 24).

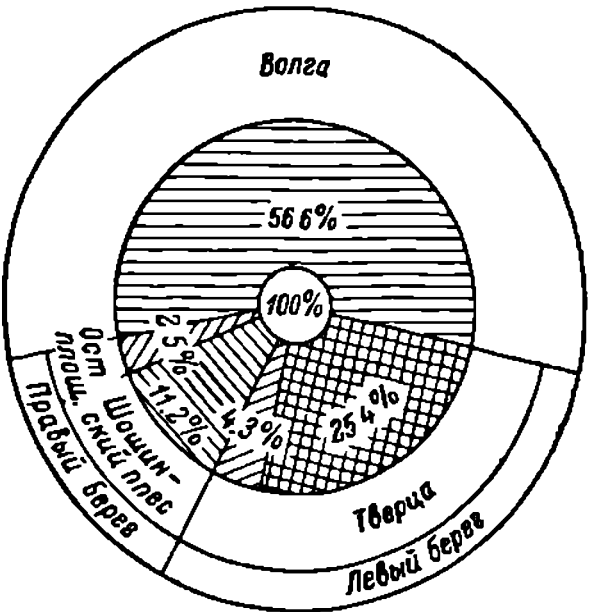


Рис. 23. Диаграмма приточности в Иваньковское водохранилище за 1951—1956 гг. (по Н. А. Зиминовой, 1959).

Таблица 24
Сезонные изменения составляющих водного баланса Иваньковского водохранилища (в млн м³) за 1951—1956 гг. (по Н. А. Зиминовой, 1959)

Приход	Сезон				Расход	Сезон			
	XII—III	IV—V	VI—VII	IX—XI		XII—III	IV—V	VI—VII	IX—XI
Приток	1656	5144	1832	2454	Сброс через гидроузел	1828	3840	1510	2160
Осадки	13.6	23.3	69.6	48.2	Забор в канал	254	121	344	309
Затопленный лед	—	85.4	—	—	Испарение	—	21.6	89.1	26.8
Возврат воды шлюзом № 2 и насосной станцией № 182	24.1	13.7	47.5	46.5	Обсолпий лед	66.0	—	—	2.2
Всего	1694	5266	1949	2549	Всего	2148	3983	1943	2498
Процент от годовой величины	14.8	46.0	17.0	22.2	Процент от годовой величины	20.2	37.7	18.4	23.7

Иваньковское водохранилище характеризуется высоким водообменом: в среднем объем его обновляется за 26 дней, тогда как средний объем Рыбинского водохранилища обновляется за 7 месяцев (Рутковский и Курдина, 1959). Наиболее интенсивный водообмен в водохранилище

Средние многолетние составляющие водного баланса **Иваньковского водохранилища** (в км³) за 1951 — 1956 гг.
(по Н. А. Зиминовой, 1959)

Приход		Расход	
Приток	11.08	Сброс через гидроузел	9.34
Возврат воды плузом № 2 и насосной станцией № 182	0.13	Забор в канал	1.02
Осадки	0.15	Испарение	0.14
Затопленный лед и снег	0.08	Обсохший лед	0.07
Изменение объема за год	0.02	Ошибки	0.44
Ошибки	0.45		
Всего		Всего	11.01

наблюдается весной. В период летне-осенней межени он резко уменьшается и вновь увеличивается во второй половине зимы. Существенные различия в интенсивности водообмена по годам отмечаются лишь для весны. В остальные сезоны водообмен меняется из года в год незначительно.

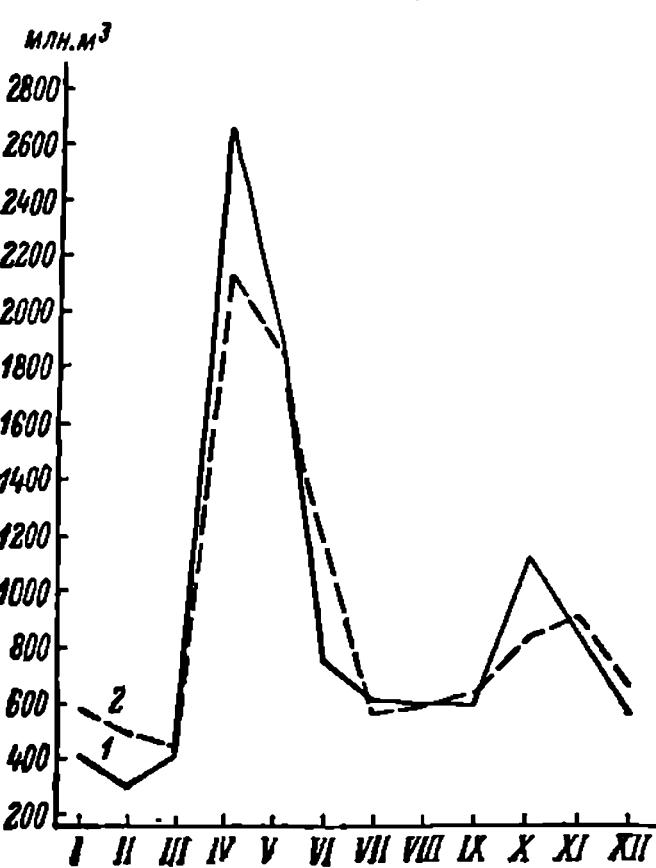


Рис. 24. Соотношение сумм приходных (1) и расходных (2) элементов водного баланса **Иваньковского водохранилища** (по Н. А. Зиминовой, 1959).

Основные составляющие водного баланса **Угличского водохранилища** представлены в табл. 27. Наполнение и питание данного водоема происходит главным образом за счет сбросов воды из **Иваньковского водохранилища**, которое дает 67.6% общего притока в водоем. Наиболее крупные притоки водохранилища — **Медведица**, **Дубна** и **Нерль** — дают 26.7% притока. Расходную часть водного баланса водоема составляют сбросы воды через гидроузел.

В расходной части водного баланса **Угличского водохранилища** некоторые особенности по сравнению с водным балансом **Иваньковского** и **Рыбинского водохранилищ** имеет лишь испарение. В **Угличском водохранилище** объем испарившейся воды составляет лишь 57% годового объема осадков, тогда как в **Иваньковском** и **Рыбинском водохранилищах** эти

величины практически равны между собой. Преобладание осадков над испарением в данном случае объясняется морфометрическими особенностями водоема.

В связи с колебанием расхода рек величина годового притока в водохранилище непостоянна и может изменяться от 10 до 20 км³ (**Курдина, 1959**). Наибольшее количество воды поступает в период весеннего половодья и осенью, а наименьшее — летом и зимой (табл. 28). В соответствии с объемом притока идет и сработка водохранилища.

Т а б л и ц а 26

Внутригодовое распределение приточности (в ‰)
в Иваньковском водохранилище
(по Н. А. Зиминовой, 1959)

Весна (IV—V)	Лето (VI—VIII)	Осень (IX—XI)	Зима (XII—III)
46.4	16.5	22.1	15.0

По характеру водообмена Угличское водохранилище сходно с Иваньковским. Объем водной массы водохранилища, по расчетам Т. Н. Курдиной (1959), обновляется в среднем раз в месяц, но есть основания предполагать, что он происходит более интенсивно. На это указывают данные по скорости течения в водоеме, которые рассматриваются в соответствующем разделе. Наибольшая интенсивность водообмена наблюдается

Т а б л и ц а 27

Средние многолетние составляющие водного баланса
Угличского водохранилища (в км³) за 1950—1956 гг.
(по Т. Н. Курдиной, 1959)

Приход		Расход	
Приток	13.89	Сброс	13.08
Осадки	0.14	Испарение	0.08
Затопленный лед	0.05	Фильтрация	0.10
Иаменение объема за год	0.01	Обсохший лед	0.05
Ошибки	0.39	Ошибки	0.39
Всего	13.70	Всего	13.70

в весенний и зимний периоды, а наименьшая — летом и осенью. Характер внутригодового водообмена относительно устойчив и существенные различия в интенсивности водообмена, как и в Иваньковском водохранилище, отмечаются лишь весной.

Шекснинское водохранилище образовалось недавно и в настоящее время нет достаточного количества материалов для полной характеристики

Т а б л и ц а 28

Внутригодовое распределение приточности (в ‰)
в Угличском водохранилище
(по Т. Н. Курдиной, 1959)

Весна (IV—V)	Лето (VI—VIII)	Осень (IX—XI)	Зима (XII—III)
45.2	15.6	23.0	16.2

гидрологических процессов, протекающих в нем. Это относится и к водному балансу. Наполнение и питание водохранилища осуществляется за счет стока с бассейна, который расположен в зоне избыточного увлажнения. В водохранилище впадает много рек. Самые крупные из них — Ковжа

и Кема дают немного больше половины всего притока. Средний много-летний объем годового стока Шексны в створе плотины составляет 5.27 км³. По данным Гидропроекта, в средний по водности год на апрель—июнь приходится 68% годового стока. Изменчивость объема весеннего половодья из года в год невелика. За июль—август сток составляет 3%, за сентябрь—октябрь — около 6% и за ноябрь—март — 23%. Таким образом, наибольшее количество воды в водохранилище поступает в период весеннего половодья.

Шекснинское водохранилище характеризуется замедленным водообменом. Коэффициенты водообмена, вычисленные М. Г. Ершовой (1968), представлены в табл. 29. Наиболее интенсивный водообмен в водо-

Т а б л и ц а 29

Среднемесечные коэффициенты водообмена Шекснинского водохранилища
(по М. Г. Ершовой, 1968)

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1964	—	—	—	0.01	0.17	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09	0.10
1965	0.18	0.10	0.10	0.01	0.11	0.08	0.06	0.04	0.03	0.03	—	—

хранилище наблюдается во второй половине весны и в первой половине зимы. В период летне-осенней межени он резко уменьшается и в отдельные годы практически отсутствует. Это полностью согласуется с режимом сработки водохранилища.

Представление о приходной и расходной составляющих водного баланса Рыбинского водохранилища можно получить из табл. 30.

Т а б л и ц а 30

Среднегодовой водный баланс Рыбинского водохранилища
и пределы колебаний его отдельных элементов с 1947—1948 гг.
по 1954—1955 гг.

(по В. И. Рутковскому и Т. Н. Курдиной, 1959)

Элемент водного баланса	Средний приход, км	Пределы колебаний годовых величин, км	Элемент водного баланса	Средний расход, км	Пределы колебаний годовых величин, км³
Приток	33.30	27.8—46.4	Сброс	31.30	23.6—44.4
Осадки	2.08	1.7—2.9	Испарение	2.15	1.6—2.5
			Фильтрация . . .	1.2	
			Изменение объема водохранилища с апреля 1947 по апрель 1955 г.	0.2	—
Ошибки	—0.26	0.75%	Ошибки	0.27	0.75%
Всего	35.12		Всего	35.12	

В среднем за год приход и расход воды в Рыбинском водохранилище составляют 35 км³. Основную роль в питании водохранилища играют реки Волга, Молога и Шексна. Они вносят в водоем около 2/3 общего количества воды. Объем приточности в Рыбинское водохранилище, приходящийся на долю этих рек в первом приближении, представлен в табл. 31.

Т а б л и ц а 31

Соотношение отдельных составляющих приточности
Рыбинского водохранилища
(по В. И. Рутковскому и Г. Н. Курдиной, 1959)

Река	Створ	Приточность, %
Волга	Углич	36
Молога	Устюжна	13
Шексна	Черная Гряда	15
Остальные реки		36

Из нее видно, что 36% притока в водохранилище дают средние и малые реки. Самый крупный приток Мологи — Чагодоша впадает выше зоны выклинивания подпора, а бывший приток Шексны — Суда впадает теперь непосредственно в водохранилище. Реки, впадающие в настоящее время в водохранилище, были в прошлом притоками Волги, Мологи или Шексны. Находясь в сходных физико-географических условиях с основными реками, воды средних и малых рек, вероятно, и по химическому составу близки к водам последних (Алекин, 1948). Основываясь на этом, мы попытались разделить сток средних и малых рек между Волгой, Мологой и Шексной по принципу гидрографической принадлежности притоков и учесть его в сумме со стоком этих рек (табл. 32).

Т а б л и ц а 32

Распределение стока с бассейна Рыбинского водохранилища
между Волгой, Мологой и Шексной

Река	1954		1955	
	км	%	км ³	%
Волга	9.82	35	18.83	37
Молога	7.52	27	13.08	26
Шексна	10.75	38	17.84	37
Всего	28.09	100	49.75	100

Расчеты стока выполнены нами для двух крайних по водности лет — маловодного 1954 и многоводного 1955 г. Из табл. 32 видно, что хотя значения приточности в водохранилище из года в год изменяются в больших пределах, распределение стока между Волгой, Мологой и Шексной независимо от водности года практически остается постоянным. Сопоставление данных табл. 31 и 32 показывает, что учет стока малых и средних рек существенно меняет соотношение стока Волги, Мологи и Шексны. Сток Мологи увеличивается примерно на 13%, а сток Шексны — более чем вдвое. С учетом стока малых рек сток Волги и Шексны становится практически одинаковым, а сток Мологи примерно на 10% меньше. Иными словами, Волга и Шексна принимают равное участие в формировании водных масс водохранилища, а Молога — несколько меньшее.

Для выявления участия вод той или иной реки в формировании водных масс водохранилища в отдельные сезоны года необходимо провести анализ сезонных изменений стока рек. На рис. 25 показано изменение стока Волги, Мологи и Шексны для двух лет с экстремальными значениями водности, а данные табл. 33 дают представление о различиях во внутригодовом распределении стока рассматриваемых лет.

Таблица 33

Распределение годового стока волжских, моложских и шекснинских вод по сезонам

Река	Весна (IV—V)		Лето (VI—VIII)		Осень (IX—XI)		Зима (XII—III)	
	км³	%	км³	%	км³	%	км³	%
1954 г.								
Волга	3.28	33.4	1.10	11.2	2.16	22.0	3.28	33.4
Молога	3.05	40.6	1.32	17.6	2.02	26.8	1.13	15.0
Шексна	3.49	32.4	2.43	22.6	3.25	30.3	1.58	14.7
1955 г.								
Волга	12.23	64.9	2.65	14.1	1.06	5.6	2.89	15.4
Молога	8.39	64.2	3.04	23.2	0.73	5.6	0.92	7.0
Шексна	9.15	51.3	5.45	30.6	2.13	11.9	1.11	6.2

Сезонное распределение стока Мологи и Шексны после создания Рыбинского водохранилища практически не изменилось. Значительная часть годового стока этих рек приходится на весеннее половодье: 30—40% — в маловодный год и 50—60% — в многоводный, причем весенний сток Шексны всегда несколько больше стока Мологи. В летне-осенний период объем стока этих рек определяется водностью года. Так, в маловодный год летний сток Мологи и Шексны меньше осеннего, а в многоводный — наоборот (см. табл. 33). Минимальный сток в году как у Мологи, так и у Шексны наблюдается зимой. В отдельные годы зимний сток этих рек составляет менее 10% от годового. Как и в предшествующие сезоны, объем стока Шексны зимой значительно больше стока Мологи.

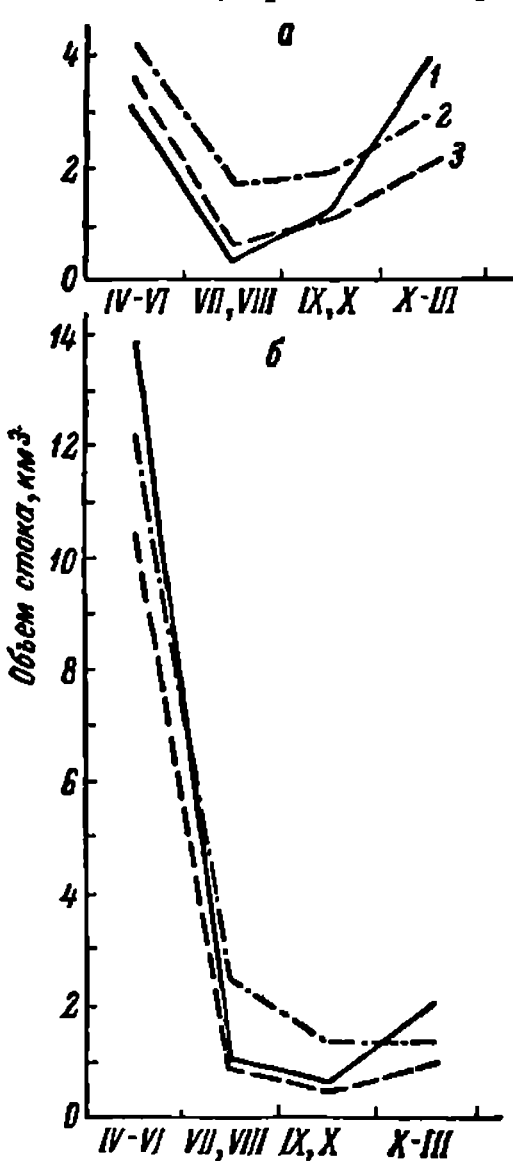


Рис. 25. Сезонное колебание притока в Рыбинское водохранилище в маловодный (а) и многоводный (б) годы.

1 — Волга; 2 — Шексна; 3 — Молога.

хранилищ весенний сток Волги значительно увеличивается по сравнению с маловодным и в отдельных случаях может быть выше 60% от годового.

Из табл. 30 видно, что приток в водохранилище за период 1947—1955 гг. составил в среднем 33.3 км^3 в год, или 95% от приходной части баланса, и почти совпал с многолетним притоком, рассчитанным при проектировании (32.5 км^3). Вторым компонент приходной части баланса — осадки — за это же время в среднем составил 2.08 км^3 . В расходной части водного баланса основную роль играет сброс воды через сооружения Рыбинского гидроузла. Средний многолетний сброс из Рыбинского водохранилища, по расчетам В. И. Рутковского и Т. Н. Курдиной (1959), равен 31.3 км^3 .

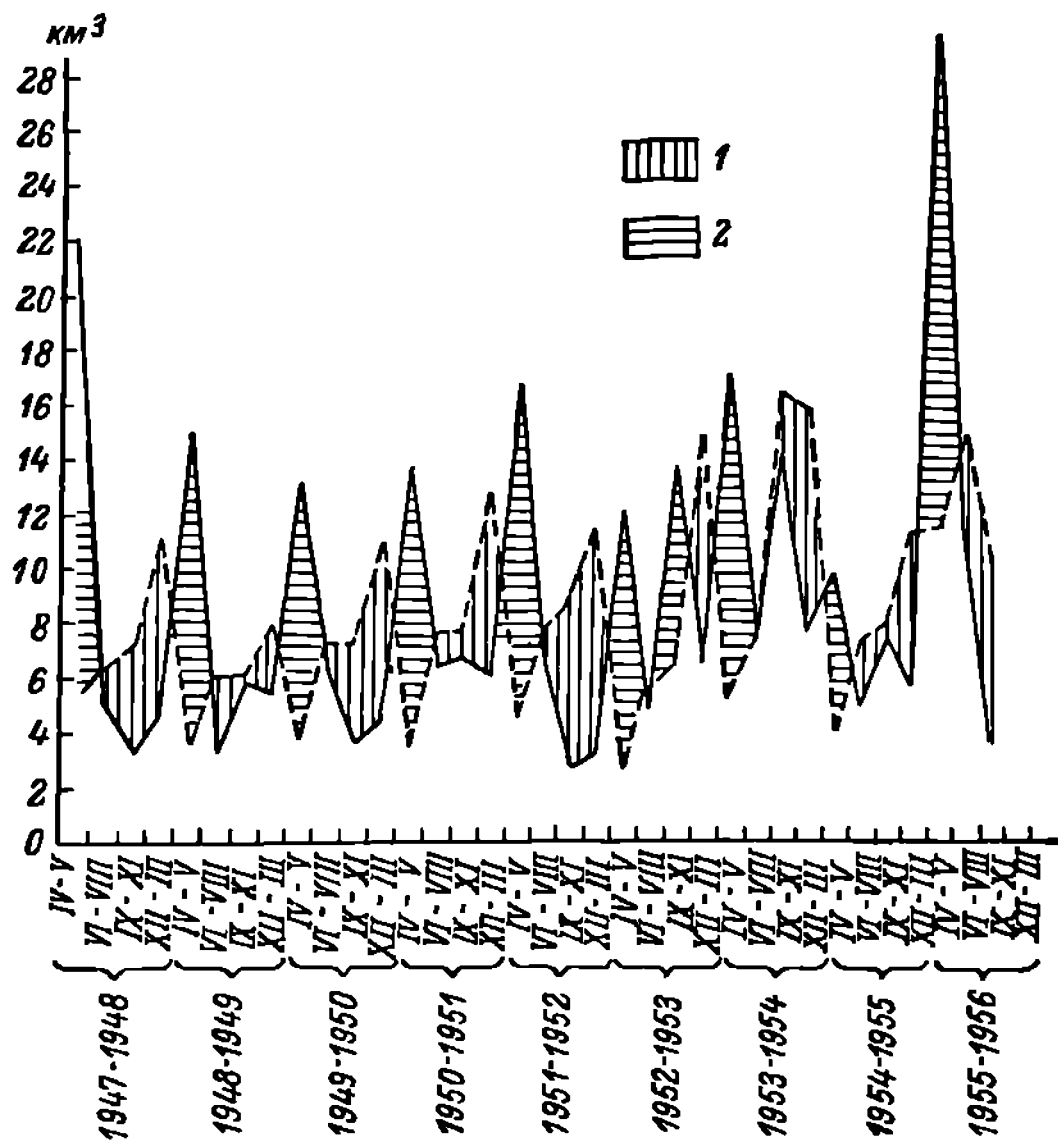


Рис. 26. Динамика основных элементов водного баланса Рыбинского водохранилища за 1947—1956 гг. (по В. И. Рутковскому и Т. Н. Курдиной, 1959).

1 — расход воды; 2 — приток воды.

Объем испарившейся воды с площади водохранилища несколько превышает ее поступление за счет осадков.

Общее представление о накоплении и расходе воды по сезонам в Рыбинском водохранилище дает разность между приходными и расходными элементами водного баланса. По средним данным В. И. Рутковского и Т. Н. Курдиной (1959), весной поступление воды в водохранилище превышает расход на 12.7 км^3 . В остальные сезоны расход превышает приход: летом на 2 км^3 , осенью — на 2 км^3 и зимой — на 8.2 км^3 .

Об особенностях режима водохранилища в отдельные годы можно судить по рис. 26, на котором показана динамика основных элементов водного баланса по сезонам без учета образования и таяния льда. Как видно из этого рисунка, увеличение объема водной массы в водохранилище весной происходит в основном за счет притока, но следует отметить, что максимальный весенний запас воды определяется часто не только

объемом притока, но и величиной запаса ее в водохранилище в предвесенний период. Летом, осенью и зимой соотношение различных вод и изменение общего объема их в водохранилище определяется разностью между сбросом и притоком, причем ведущим фактором в эти сезоны является сброс.

По характеру водообмена Рыбинское водохранилище заметно отличается от Иваньковского и Угличского. Объем его водной массы сменяется в среднем один раз за 7 месяцев, т. е. интенсивность водообмена в нем примерно в 7 раз меньше, чем в этих водоемах.

Сброс воды из Рыбинского водохранилища является основной составляющей приходной части водного баланса Горьковского водохранилища.

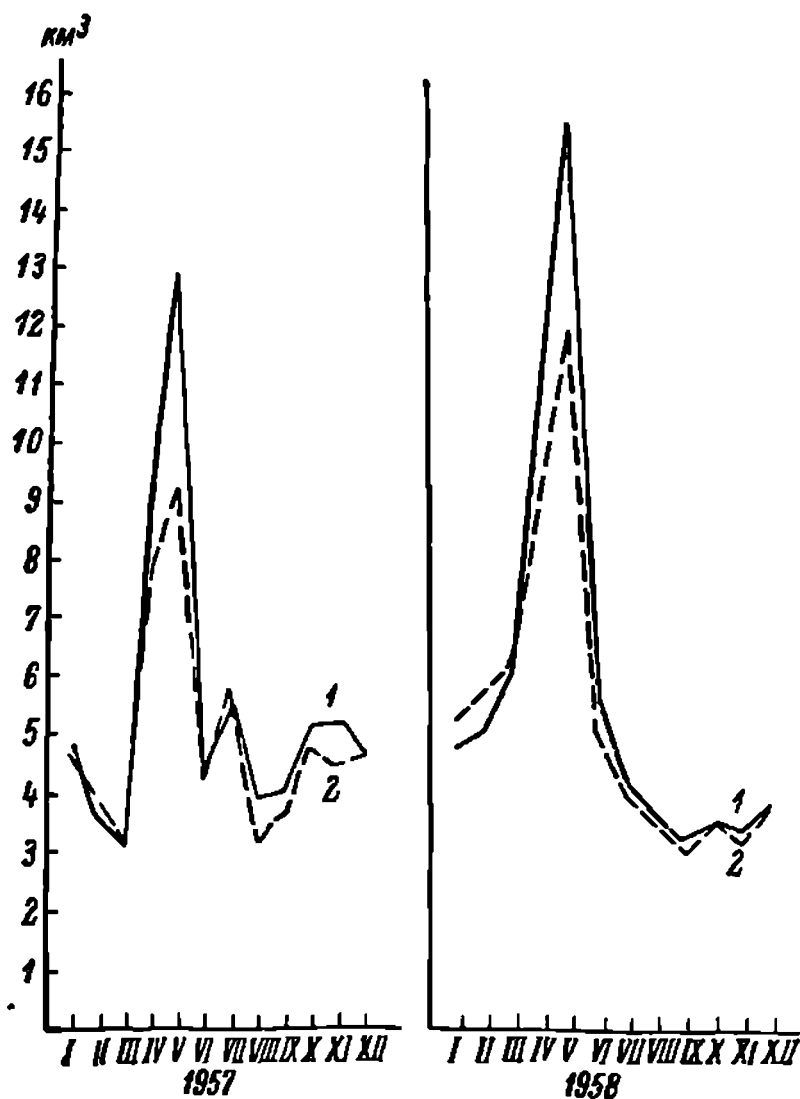


Рис. 27. Соотношение приходной (1) и расходной (2) составляющих водного баланса Горьковского водохранилища.

В среднем он составляет 36 км^3 в год, или 63% от общего притока воды в водоем, но в отдельные годы величина его может отклоняться от среднего значения. Так, в 1957 г. сброс воды из Рыбинского водохранилища составлял 41.59 км^3 , а в 1958 г. — 41.49 км^3 , или соответственно 64 и 60% от общего поступления воды в водохранилище. Второй по величине составляющей приходной части баланса является боковая приточность, которая в 1957 г. равнялась 22.93 км^3 , а в 1958 г. — 26.50 км^3 . Осадки, выпадающие на зеркало Горьковского водохранилища, невелики и обычно не превышают 1 км^3 .

В табл. 34 представлены основные составляющие водного баланса водохранилища за два произвольно взятых года. Из нее и рис. 27 видно, что

роль основных составляющих приходной части водного баланса водоема существенно меняется от сезона к сезону. Наибольшее количество воды в водохранилище поступает в весеннее половодье, причем основную массу воды в данный период доставляют боковые притоки. Весной боковая приточность дает в среднем вдвое больше воды, чем величина сброса из Рыбинского водохранилища. В летне-осенний период и особенно зимой ее доля в питании водохранилища резко сокращается: приток по Волге летом и осенью в 3 раза, а зимой в 8 раз превышает объем стока боковых притоков.

В расходной части баланса Горьковского водохранилища, как и всех других водоемов, основную роль играет сброс воды через гидроузлы. Из табл. 34 видно, что в 1957 г. его величина составляла 58.21 км^3 , а в 1958 г. — 63.31 км^3 , что равно примерно 98% расходной части баланса.

Морфометрические особенности Горьковского водохранилища и характер регулирования его обеспечивают более интенсивный по сравнению

Среднегодовые составляющие водного баланса Гурьковского водохранилища (в км³)

Составляющая водного баланса	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
1957 г.													
Приход													
Приток воды из Рыбинского водохранилища	4.17	3.10	2.64	2.67	5.63	2.86	3.52	3.17	3.23	2.89	3.78	3.93	41.59
Боковая приточность	0.60	0.48	0.49	6.04	6.92	1.35	1.91	0.61	0.62	2.11	1.25	0.55	22.93
Осадки на зеркало водохранилища	0.04	0.04	0.03	0.04	0.04	0.18	0.09	0.07	0.10	0.09	0.03	0.07	0.82
Объем воды во всплывшем льду со снегом	0.00	—	—	0.06	—	—	—	—	—	—	—	—	0.06
Всего	4.81	3.62	3.16	8.81	12.59	4.39	5.52	3.85	3.95	5.09	5.06	4.55	65.40
Расход													
Общий сток через Горьковскую ГЭС	4.66	3.87	3.08	7.86	9.12	3.95	5.68	2.99	3.37	4.63	4.43	4.57	58.21
Испарение	—	0.01	0.01	0.00	0.11	0.14	0.12	0.18	0.19	0.07	0.01	0.01	0.85
Потери воды на обсыхание льда со снегом	—	0.05	0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.07
Всего	4.66	3.93	3.10	7.86	9.23	4.09	5.80	3.17	3.56	4.70	4.44	4.59	59.13
Аккумуляция в таше водохранилища													
Невязка водного баланса, км³	0.17	—0.34	—0.03	0.25	2.62	0.27	—0.52	0.64	0.07	—0.20	0.33	—0.22	3.04
Невязка водного баланса, %	—0.02	0.03	0.09	0.70	0.74	0.03	0.24	0.04	0.32	0.59	0.29	0.18	3.23
Невязка водного баланса, %	0.4	0.8	2.9	7.9	5.9	0.7	4.1	1.0	8.1	12.5	5.7	3.9	4.9

Таблица 34 (продолжение)

Составляющая водного баланса	1958 г.												
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
Приход													
Приток воды из Ры- бинского водохра- нилища	4.12	4.44	5.43	3.42	3.18	3.81	3.38	2.92	2.65	2.30	2.54	3.30	41.49
Боковая приточность	0.61	0.48	0.52	7.23	12.00	1.52	0.65	0.63	0.55	1.06	0.79	0.46	26.50
Осадки на зеркало водохранилища . . .	0.08	0.07	0.02	0.06	0.12	0.11	0.07	0.12	0.09	0.09	0.03	0.08	0.94
Объем воды во вспльв- шем льду со снегом	—	—	—	0.04	0.06	—	—	—	—	—	—	—	0.10
Всего	4.81	4.99	5.97	10.75	15.36	5.44	4.10	3.67	3.29	3.45	3.36	3.84	69.03
Расход													
Общий сток через Горьковскую ГЭС	5.25	5.61	6.27	8.94	11.89	4.98	3.80	3.40	2.98	3.43	3.01	3.75	63.31
Испарение	0.01	0.00	0.01	—	0.01	0.10	0.19	0.20	0.13	0.07	0.01	0.00	0.73
Потери воды на обсу- хание льда со сне- гом	0.03	0.04	0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01	0.11
Всего	5.29	5.65	6.31	8.94	11.90	5.08	3.99	3.60	3.11	3.50	3.02	3.76	64.15
Аккумуляция в чаше													
водохранилища . . .	—0.67	—0.73	—0.51	0.69	1.18	—0.04	0.00	0.06	0.04	—0.19	0.25	0.05	0.13
Невязка водного ба- ланса, км³	0.19	0.07	0.17	1.12	2.28	0.40	0.11	0.01	0.14	0.14	0.09	0.03	4.75
Невязка водного ба- ланса, %	3.6	1.2	2.7	10.4	14.8	7.9	2.7	0.3	4.3	4.0	2.7	0.8	6.9

с Рыбинским водообмен. Он примерно в 4 раза выше, чем в Рыбинском, но в 2 раза ниже, чем в Ивановском и Угличском водохранилищах.

Основными реками, питающими Куйбышевское водохранилище, являются Волга и Кама. Общее представление об отдельных элементах водного баланса этого водоема можно получить из данных табл. 35. Основной составляющей приходной части водного баланса является приточность Волги и Камы. Вторая по значимости и абсолютной величине составляющая — боковая приточность, которая в отдельные годы дает от 3 до 8% общего притока. Основная часть годового стока боковых притоков приходится на апрель (около 25% всего общего притока за месяц). В другие месяцы доля боковой приточности равна 2—3%. Осадки, выпадающие на зеркало водохранилища, увеличивают приходную составляющую водного баланса в среднем за год на 1.5—2%.

Таблица 35

Водный баланс (в км³) Куйбышевского водохранилища за 1957—1960 гг.
(по данным Комсомольской гидрометеорологической обсерватории)

Составляющая водного баланса	1957	1958	1959	1960
Приход				
Основная приточность (Волга и Кама)	270.49	262.93	227.14	199.50
Боковая приточность	19.94	12.70	12.20	10.67
Осадки на зеркало водохранилища	1.84	2.77	2.01	2.36
Приток за счет всплывшего льда	0.32	0.81	0.78	1.00
Конденсация водяного пара	—	0.008	—	0.049
Всего	292.70	279.29	241.99	213.58
Расход				
Сток через сооружения гидроузла	257.41	273.29	224.65	206.60
Испарение	3.95	3.16	3.57	3.46
Потери воды на ледообразование	0.41	0.72	0.88	0.87
Всего	261.77	272.97	229.10	210.93
Невязка баланса { абсолютная, км³	8.17	1.82	9.32	5.91

Расходная часть водного баланса водохранилища включает сбросы воды в нижний бьеф через сооружения ГЭС. В расходную часть баланса входят также фильтрация через тело плотины и под сооружения и испарение воды с акватории водоема. Основную долю в расходе воды занимает сток через сооружения гидроузла: от 94 до 98% общего расхода. Только на работу агрегатов ГЭС из этого количества затрачивается 82—86%. По сравнению с этим расход воды на питание плузов ничтожно мал: за год 0.2—0.5% общего стока (Боровкова и др., 1962).

В связи с более южным расположением и исключительно большим зеркалом водной поверхности существенную роль в расходной части водного баланса Куйбышевского водохранилища играет испарение. Значительная потеря воды на испарение является одной из особенностей гидрологического режима этого водохранилища. Так, в 1960 г. общее количество испарившейся воды составило 3.5 км³, или 1.2% от всей расходной части баланса (Боровкова и др., 1962). Это на 1.1 км³ больше объема осадков,

выпавших в том же году на поверхность водохранилища. Из табл. 35 видно, что значительное испарение наблюдалось и в другие годы.

Куйбышевское водохранилище рассчитано на сезонное регулирование стока. Особенностью его режима является ежегодное весеннее наполнение до нормального подпорного горизонта, а затем в течение всего года сработка до заданной отметки. По данным Комсомольской гидрометеорологической обсерватории, смена водных масс в водохранилище, равных объему накопленной воды в течение года, осуществляется более 4 раз, а в отдельные годы до 6 раз. Наиболее интенсивный водообмен наблюдается весной, в летне-осенний период он заметно уменьшается и вновь увеличивается во второй половине зимы. Это хорошо подтверждается данными расчета притока воды в водохранилище через основные входные створы (Волга — у г. Чебоксар, Кама — у г. Набережные Челны и Вятка — у сел. Вятские Поляны), а также стока воды через створ Куйбышевского гидроузла (табл. 36). Данные расходов воды через турбины Волжской

Т а б л и ц а 36

Среднемесячные расходы воды (м³ сек.)
(по П. Ф. Чигиринскому, 1962)

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1958	4490	4880	5380	12700	31100	14600	6170	4470	4160	4330	4240	3290
	5930	7420	7560	10900	26300	17600	6200	5930	4050	5310	4510	5150
1959	4760	4960	4970	16000	21900	7140	5770	4010	4270	5170	3800	3730
	6160	6610	6810	9970	19400	7170	5930	4390	4180	4380	4750	6130
1960	3890	4730	4750	15900	18600	7110	4290	3620	3490	3400	3030	3526
	5500	6270	7300	9930	20400	4630	4260	4100	4000	3890	4180	4020

Примечание. В числителе — величина притока по основным рекам (Волга, Кама, Вятка), в знаменателе — величина стока через створ гидроузла.

ГЭС им. В. И. Ленина показывают, что в период с июля по март минимальный суточный расход не бывает ниже 1800 м³/сек., обычно даже превышает эту цифру. Транзитный поток вод обуславливает значительную проточность водохранилища, в связи с чем в нем постоянно существуют стоковые течения и интенсивный водообмен.

Таким образом, водный баланс каждого из рассмотренных волжских водохранилищ существенно отличается не только от баланса других водных объектов, но и имеет особенности в отдельных водоемах. Своеобразие черт водного баланса водохранилищ определяется прежде всего формой их хозяйственного использования. В зависимости от того, используется ли водохранилище для гидроэнергетики или для водного транспорта, для мелиорации или как водоем-охладитель тепловых электростанций или имеет комплексное назначение, проявляется в своеобразие черт его водного баланса. Именно специфичность водного баланса водохранилищ и позволяет говорить о них, как о водоемах особого типа, и определяет особенности гидрологических процессов, которые особенно ярко проявляются в уровневом режиме.

Уровень водохранилищ

Колебания уровня в водохранилищах происходят под влиянием целого ряда факторов (Белых, 1959а; Буторин, 1963в), но основными из них являются приток и сток воды из водоема. Это хорошо прослежи-

вается на примере волжских водохранилищ. Характер изменения уровня в самом верхнем из них — Ивановском водохранилище — виден на рис. 28.

Интенсивное наполнение этого водохранилища до НПУ после предполоводной сработки начинается в конце марта — начале апреля и продолжается в среднем 15 дней (Зиминова, 1959). В течение навигационного периода уровень водохранилища колеблется незначительно и обычно к началу ледостава он близок к НПУ. С момента установления ледяного покрова начинается зимняя сработка водохранилища, которая продолжается до конца марта — начала апреля. По проектным данным, его общая предполоводная сработка равна 6 м, максимальная — 7 м.

Интересно отметить, что уровеньный режим в различных частях водохранилища имеет существенные различия (см. рис. 28). В верховье водохранилища, находящемся в зоне переменного подпора, в годовом ходе уровня резко выражен пик половодья, возвышающийся над летней меженью в среднем на 4 м. После прохождения пика половодья этот участок вновь попадает в зону подпора и его уровень в этот период практически такой же, как и в предплотинной части водохранилища. При интенсивной сработке водохранилища зимой его верхние участки снова выходят из подпора и имеют речной режим.

Аналогичный характер изменений уровня в течение года наблюдается и в Угличском водохранилище (рис. 29). При небольшом объеме этого водохранилища в нем, как правило, в навигационный и зимний периоды поддерживается уровень, близкий к НПУ. Основная сработка водохранилища производится в марте и апреле, а в половодье оно вновь наполняется до подпорного уровня. Из рис. 29 видно, что даже в таком русловом водохранилище, как Угличское, величина весеннего подъема уровня в различных частях водоема неодинакова.

Уровеньный режим Шекснинского водохранилища в соответствии с основным назначением водоема обеспечивает необходимые условия для судоходства. В связи с этим после весеннего наполнения водохранилища до НПУ уровень в нем с мая по октябрь поддерживается на относительно постоянной отметке, близкой к НПУ. За первые два года его существования колебания уровня в этот период не превышали ± 20 см (Ершова, 1968). В осенне-зимний период производится сработка водохранилища не более чем на 1.2 м. Весной водохранилище вновь наполняется до НПУ. При этом часть половодья сбрасывается, поскольку полезный объем

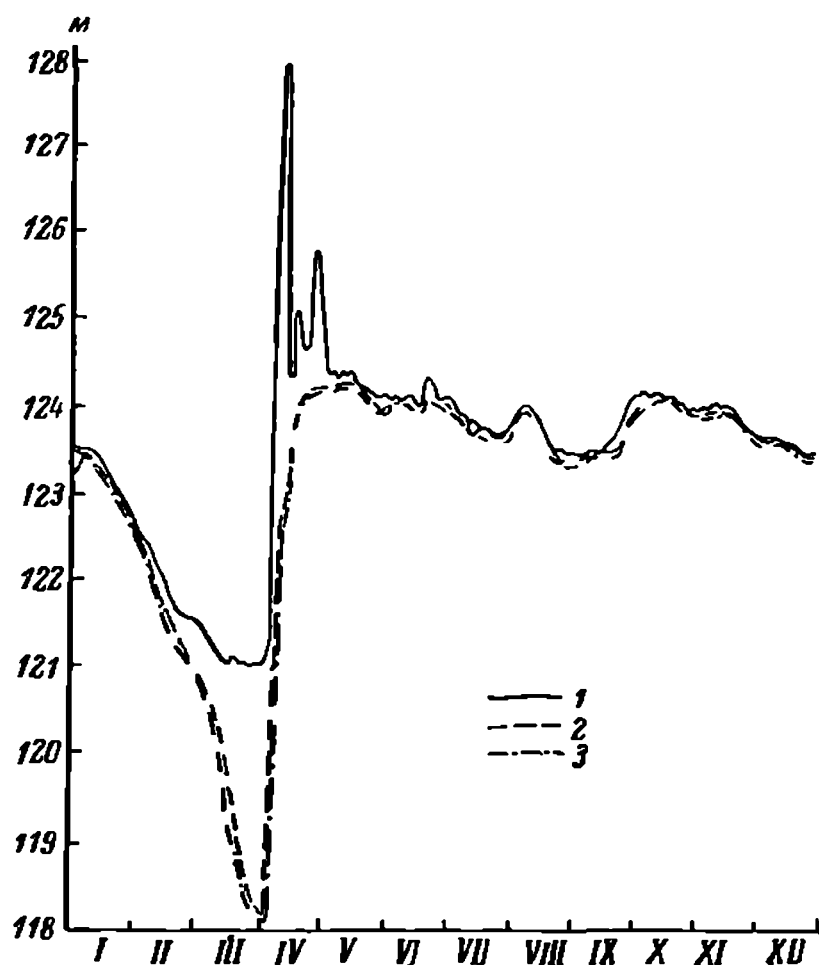


Рис. 28. Годовой ход уровня в Ивановском водохранилище в 1957 г. у водпостов Калнин (1), Конаково (2), Большая Волга (3) (по Н. А. Зиминовой, 1959).

водоема меньше среднего многолетнего объема половодья его притоков.

Особенно сложен режим уровня в Рыбинском водохранилище. Большое несоответствие в поступлении воды в водохранилище и сбросе ее из него в отдельные сезоны, особенно весной и зимой, приводит к резким и значительным колебаниям уровня. Как и в других водохранилищах волжского каскада, искусственное регулирование стока обуславливает в годовом цикле уровня Рыбинского водохранилища три характерных периода: весенний, летне-осенний и зимний. В зависимости от водности года и внутригодового распределения притока, а также от режима

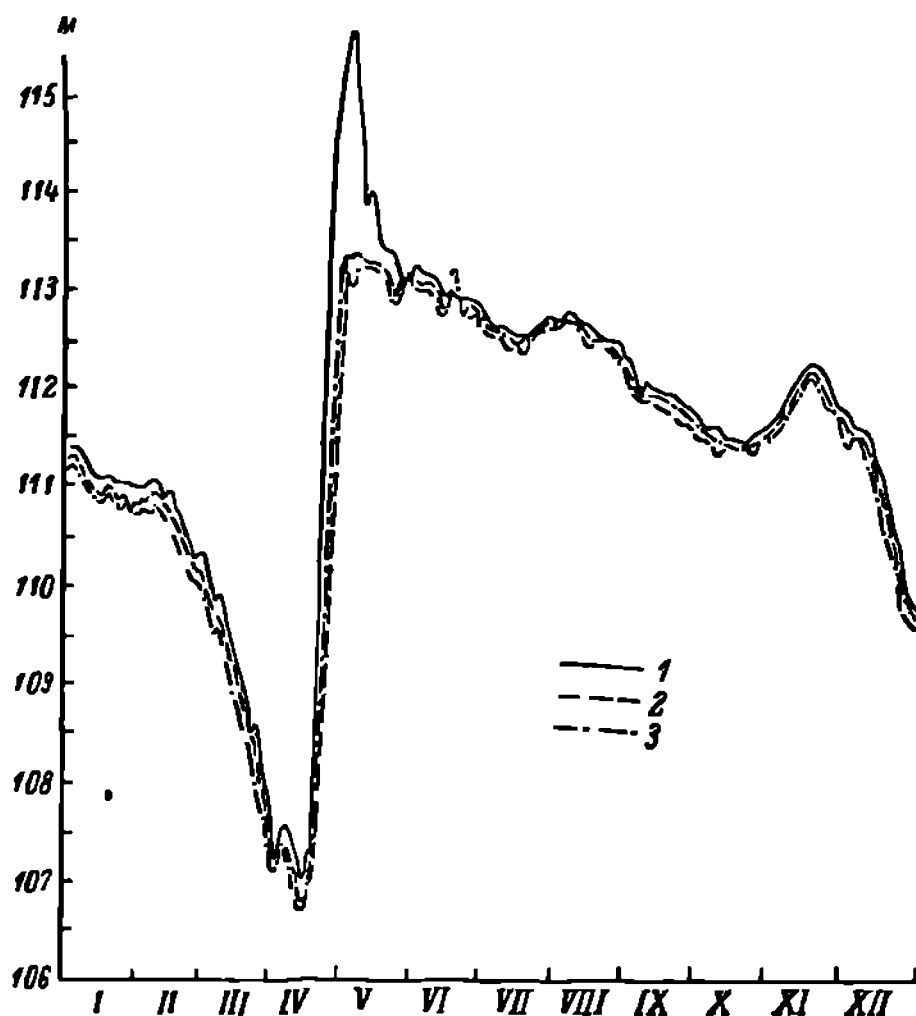


Рис. 29. Годовой ход уровня в Угличском водохранилище в 1955 г. у водостов Кимры (1), Калязин (2), Углич (3) (по Т. Н. Курдиной, 1959).

работы гидросооружений характер колебаний уровня в одни и те же периоды из года в год может сильно меняться. При подробном анализе кривых уровня водохранилища за различные годы нами выделено четыре основных типа колебаний уровня (Буторин, 1963в).

Первый тип. Уровень водохранилища к концу весеннего наполнения достигает или несколько превышает отметку НПУ. Наполнение водохранилища заканчивается в конце мая и после непродолжительного стояния около максимальной отметки начинается снижение уровня, продолжающееся до начала последующего весеннего наполнения. В такие годы в летне-осенний период приток воды в водохранилище меньше, чем расход ее на сбросы и испарение. В отдельных случаях уровень водохранилища понижается довольно интенсивно (рис. 30, а), в других — более медленно (рис. 30, б). Иногда общее понижение уровня в конце летне-осеннего периода сменяется повышением за счет увеличения приточности в период осенних дождевых паводков (рис. 30, в).

Второй тип. Уровень водохранилища к концу весеннего наполнения, как и у первого типа, достигает или несколько превышает отметку

НПУ. Но в отличие от него он в течение всего летне-осеннего периода поддерживается около максимальной отметки весеннего наполнения. В такие годы приток воды в водохранилище в летне-осенний период обычно равняется расходу или даже несколько превышает его. Понижение уровня при таком типе колебаний начинается с началом зимней сработки водохранилища (рис. 31).

Третий тип. Уровень водохранилища к концу весеннего наполнения не достигает отметки НПУ и в течение летне-осеннего периода находится значительно ниже ее. Достигнув максимальной отметки наполнения к началу лета, уровень после непродолжительного стояния около нее начинает постепенно понижаться, так как приток воды не восполняет ее расход. С началом зимней сработки водохранилища понижение уровня резко усиливается (рис. 32).

Четвертый тип. Уровень водохранилища к концу весеннего наполнения не достигает отметки НПУ и в течение летне-осеннего периода находится ниже ее. Но к концу летне-осеннего периода в результате интенсивных дождевых паводков приток воды в водохранилище оказывается значительно более высоким, чем ее расход, и наблюдается второй подъем уровня, при котором могут быть достигнуты отметки, значительно превышающие отметку весеннего наполнения (рис. 33).

В сезонном ходе уровня Рыбинского водохранилища из года в год происходят значительные изменения, причем не только в амплитуде, но и в характере самих колебаний. О величине сезонных колебаний уровня в различных пунктах водохранилища можно судить по данным табл. 37, в которой помещены годовые амплитуды его колебаний, вычисленные по максимальному и минимальному уровням года. Как следует из этой таблицы, амплитуды сезонных колебаний уровня в отдельные годы достигают больших размеров. Максимальные значения наблюдаются, как правило, в нижнем бьефе Угличской ГЭС, участок которого в определенное время выходит из зоны подпора Рыбинского водохранилища и колебания уровня на нем в этот период определяются исключительно режимом работы Угличской ГЭС. По ходу течения воды к центру водохранилища годовая амплитуда уровня постепенно уменьшается, и в расширенной части его она значительно меньше, чем в нижнем бьефе Угличской ГЭС.

Для того чтобы исключить влияние специфических особенностей отдельных лет на годовой ход уровня и выявить общие закономерности

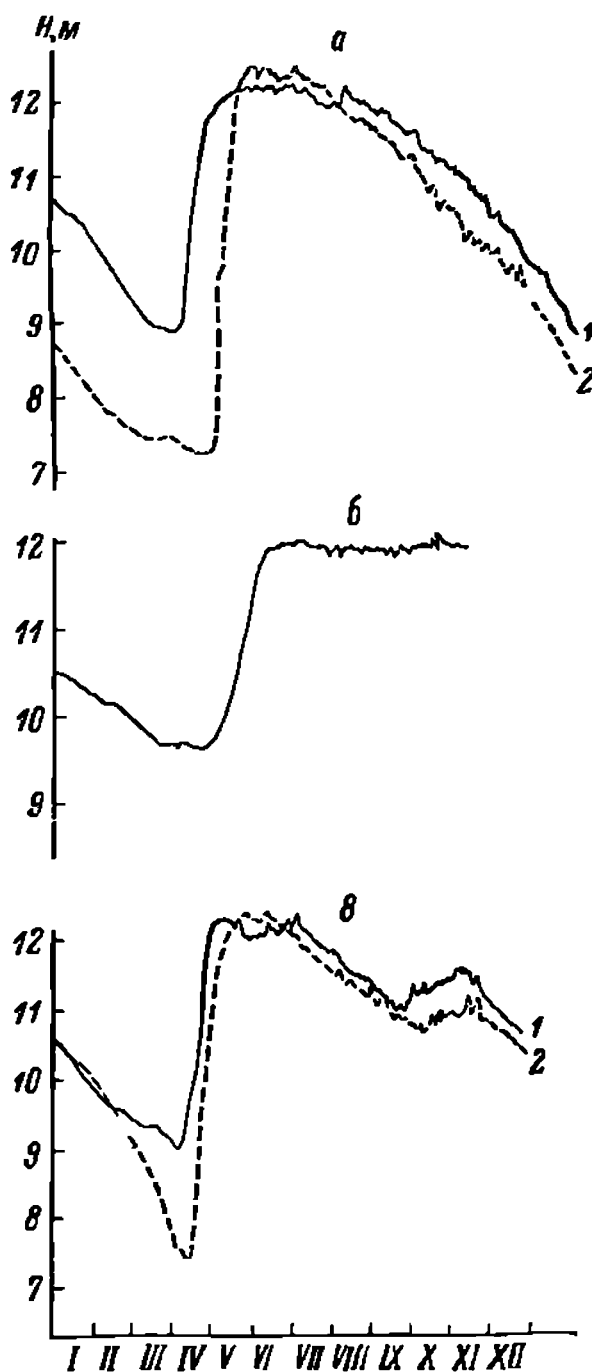


Рис. 30. Первый тип изменения уровня в Рыбинском водохранилище.

а — быстрое понижение: 1 — 1951 г., 2 — 1955 г.; б — медленное понижение (1949 г.); в — осеннее повышение: 1 — 1957 г., 2 — 1953 г.

его сезонных изменений, мы предприняли попытку использовать осредненные уровни. При осреднении средних месячных уровней за ряд лет частные отклонения уровня сглаживаются и годовая периодичность его хода становится более очевидной (рис. 35). Кривые годового хода уровня для всех пунктов водохранилища показывают, что его колебания весьма



Рис. 31. Второй тип изменения уровня в Рыбинском водохранилище (1953).

значительны. Даже полученная путем осреднения средних месячных уровней годовая амплитуда колеблется от 2.85 до 3.37 м. Все кривые на рис. 35 сходны между собой по фазе и незначительно отличаются по амплитуде. С начала календарного года уровень водохранилища понижается до марта, а затем быстро повышается и, достигнув максимального значения в июне, начинает снова понижаться. Минимальный уровень водохранилища приходится на март, а максимальный — на июнь. Наиболее резкое понижение уровня водохранилища наблюдается от января к февралю, а наиболее резкое по-

вышение — от апреля к маю. О многолетних изменениях уровня водохранилища свидетельствуют его среднегодовые значения, вычисленные для различных пунктов водоема. В табл. 38 приводятся величины изменения среднегодовых уровней из года в год, а на рис. 36 даны кривые многолетнего хода среднегодового уровня в различных пунктах водохранилища. Многолетняя амплитуда колебаний среднегодовых уровней в тех же пунктах составляет 1.84 м. Она в данном случае вычислялась как полусумма наибольшей положительной и отрицательной аномалий ряда.

Из табл. 38 видно, что изменчивость среднегодовых уровней по годам в Рыбинском водохранилище колеблется в широких пределах и в отдельных случаях достигает величины более 2 м. Естественно, что такие колебания уровня существенно влияют на все стороны жизни водоема и прежде всего на распределение водных масс в нем и на его эксплуатацию. С 1948 г.

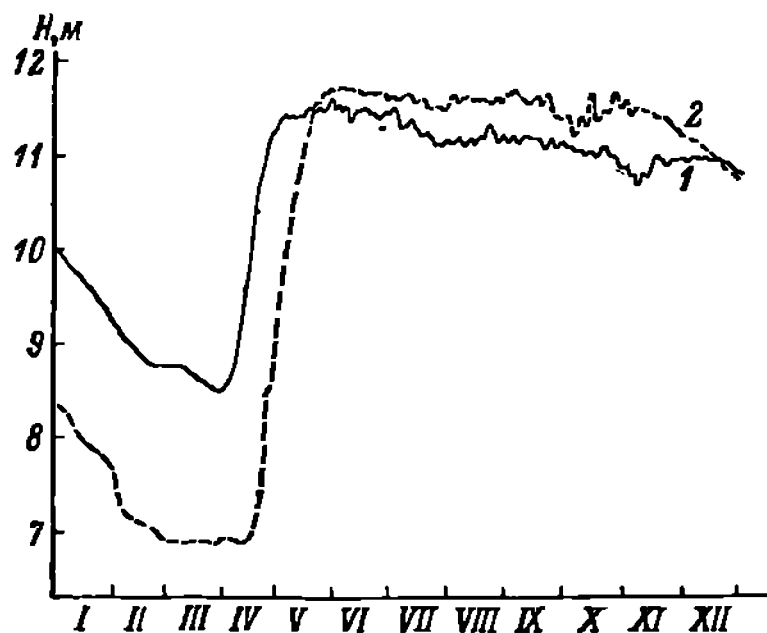


Рис. 32. Третий тип изменения уровня в Рыбинском водохранилище.

1 — 1950 г.; 2 — 1956 г.

по 1960 г. наиболее резкое понижение уровня наблюдалось от 1951 к 1952 г. и от 1953 к 1954 г. и колебалось в отдельных пунктах от 1.47 до 1.62 м. В среднем же уровень водохранилища в 1952 г. был ниже, чем в 1951 г., на 1.41 м, а в 1954 г. ниже, чем в 1953 г., на 1.51 м. В противоположность этим годам от 1952 к 1953 г. наблюдалось резкое повышение среднегодового уровня: в некоторых пунктах до 2.07 м.

Т а б л и ц а 37

Среднегодовая амплитуда колебаний уровня (в см) Рыбинского водохранилища

Пункт	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954	1955	1956	1957	1958	1959	1960
Г. Углич	563	284	372	513	537	402	278	813	638	442	534	570	489
Пос. Мышкино	343	257	336	392	489	384	267	548	515	361	—	454	367
Г. Череповец	—	—	—	—	—	353	263	560	482	354	—	—	—
Пос. Мяска	337	253	308	349	460	356	260	558	475	347	499	427	335
Г. Пошехонье-Володарск	355	253	312	357	461	370	260	551	492	353	—	—	—
Мыс Рожновский	—	—	—	—	466	352	259	542	499	349	507	507	325
Дер. Волково	338	248	324	356	381	361	256	544	499	360	—	—	—
Сел. Коприно	348	248	315	352	470	353	259	539	490	352	510	441	347
Г. Весьегонск	335	251	305	340	465	350	253	549	489	351	500	407	332
Пос. Брейтово	330	247	307	340	465	362	262	524	483	351	500	418	332
Пос. Переборы	352	253	316	345	467	353	258	545	488	404	500	430	344

Т а б л и ц а 38

Изменение средних уровней (в см) из года в год в различных пунктах Рыбинского водохранилища

Пункт	1947— 1948	1948 1949	1949 1950	1950 1951	1951—1952	1952—1953	1953 1954	1954 1955	1955 1956	1956 1957	1957 1958	1958 1959	1959 1960
Г. Череповец	—	—	—	—	—	—	—147	—91	103	98	—43	22	—162
Пос. Мяска	27	60	38	38	—158	207	—148	8	6	100	—	—	—
Г. Пошехонье-Володарск	27	53	—48	—	—157	204	—149	11	4	97	—	—	—103
Мыс Рожновский	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Дер. Волково	25	56	—49	40	—147	193	—151	9	5	100	—	—	—
Г. Весьегонск	23	57	—48	39	—155	203	—151	11	4	95	—42	28	—179
Пос. Брейтово	19	58	—47	39	—161	207	—153	10	3	97	—36	27	126
Сел. Коприно	22	58	—49	39	—157	205	—151	11	3	97	—35	21	—123
Пос. Переборы	22	56	—49	39	—160	207	—150	7	6	97	—38	23	—123
Г. Углич	7	48	—40	41	—155	200	—151	29	—9	91	—	—	—124
Пос. Мышкино	15	56	—46	40	—158	206	—162	6	2	97	—34	17	—

П р и м е ч а н и е. Число со знаком минус — величина понижения уровня.

При анализе изменений среднегодовых уровней в многолетнем ходе их намечается чередование лет высокого и низкого уровня. Особенно наглядно это видно на кривых рис. 36. С 1947 по 1960 г. с наиболее высоким уровнем были годы 1949, 1951, 1953, 1957 и 1959, а с наиболее низким — 1950, 1952, 1954, 1955, 1956, 1958 и 1960. Следовательно, за исключением 1955 г., все нечетные годы имели высокий уровень, а все четные — низкий. Из приведенных данных трудно установить какую-либо закономерность многолетнего хода уровня водохранилища, но определенная направленность его изменений намечается.

В связи с большими колебаниями уровня площадь зеркала водохранилища и объем воды в нем претерпевают значительные изменения. В результате зимней сработки площадь водохранилища может уменьшаться на 48%, а объем на 67% (Антипова, 1961). По нашим подсчетам, зона временного затопления, ограниченная положением самого низкого и самого высокого уровня водохранилища с момента его наполнения до НПУ, составляет около 255 400 га (Буторин и др., 1962). Такое изменение площади зеркала водоема, несомненно, оказывает замет-

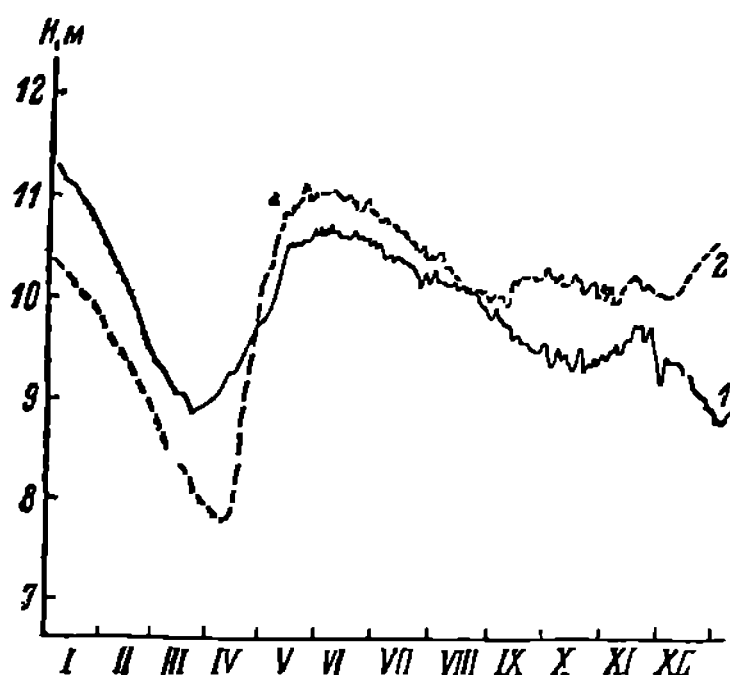


Рис. 33. Четвертый тип изменения уровня в Рыбинском водохранилище.

1 — 1954 г.; 2 — 1960 г.

ное влияние на гидрологические, гидрохимические и биологические процессы, протекающие в нем.

Кроме колебаний уровня, связанных с изменением запасов воды в Рыбинском водохранилище, наблюдаются также изменения его, возникающие в результате различного рода денivelляций (Белых, 1959а). Основной из них является сгонно-нагонная, или ветровая денivelляция. Физическая сущность сгонно-нагонных явлений заключается в том, что под воздействием ветра поверхностные частицы воды приобретают

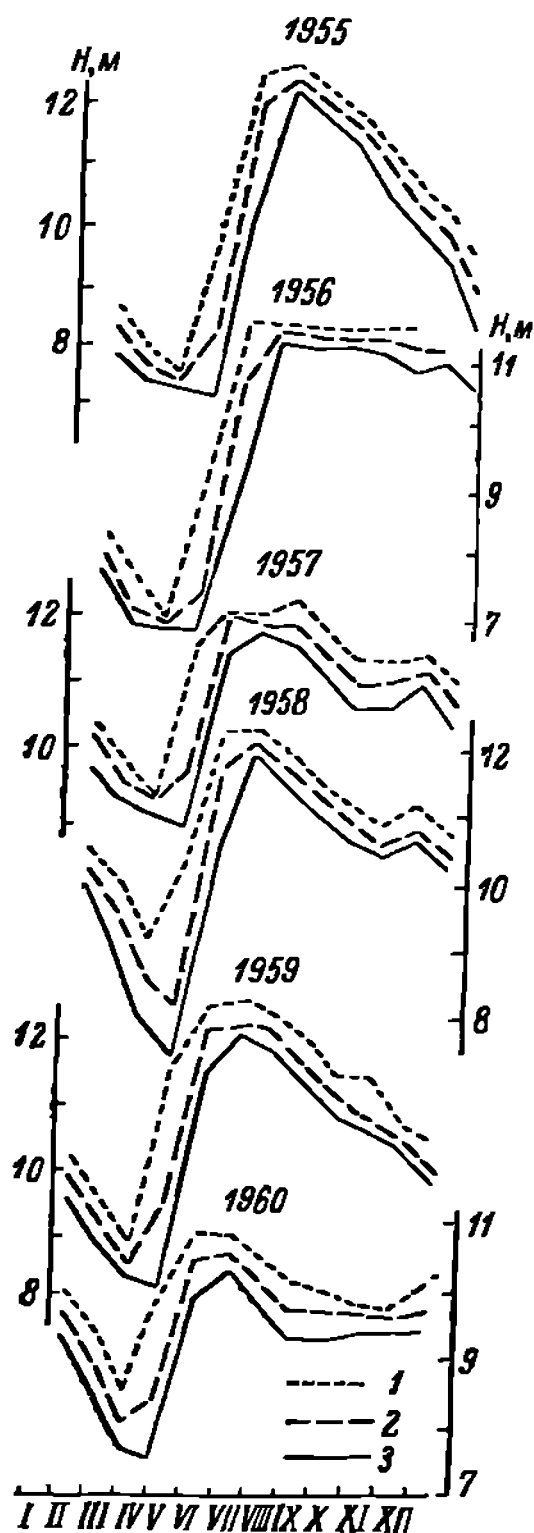


Рис. 34. Годовой ход уровня в Рыбинском водохранилище.

1 — максимальный уровень;
2 — средний уровень; 3 — минимальный уровень.

не только орбитальное движение, но и поступательное — по направлению ветра. Первый вид движения частиц воды вызывает ветровые волны, а второй — ветровое течение. Ветровое течение захватывает некоторый поверхностный слой воды и переносит его от подветренного берега к наветренному. В результате такого переноса создается уклон водной поверхности и уровень у наветренного берега повышается, а у подветренного понижается.

Такой перекося уровня вызывает увеличение гидростатического давления в районе нагона, а последнее обуславливает появление в придонных слоях компенсационного течения, направленного в сторону, противоположную ветровому поверхностному течению. Первоначально количество воды, переносимое ветровым течением в единицу времени к наветренному берегу, будет больше оттока в придонных слоях и уровень воды у наветренного берега будет непрерывно повышаться. Однако с повышением уровня будет увеличиваться и уклон водной поверхности и, как следствие, возрастет ско-

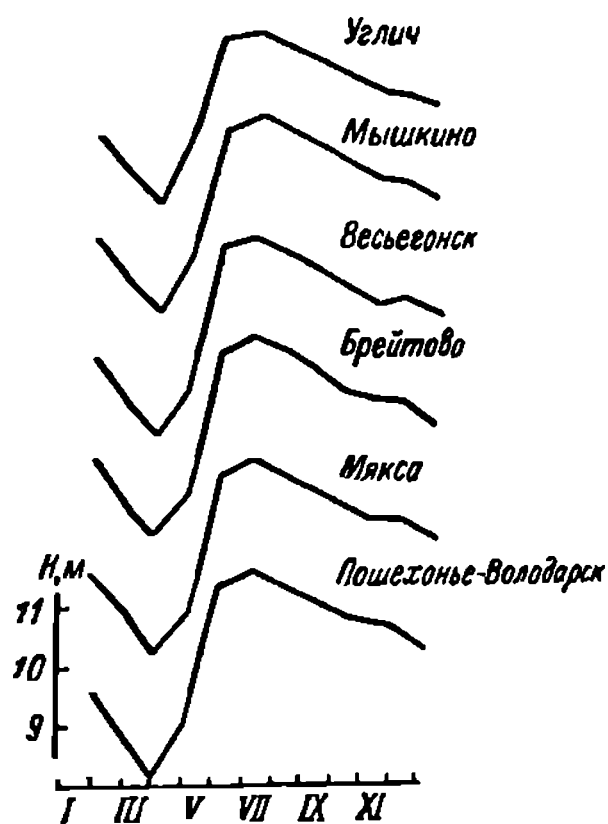


Рис. 35. Годовой ход уровня в отдельных пунктах Рыбинского водохранилища за 1948—1960 гг. по осредненным данным.

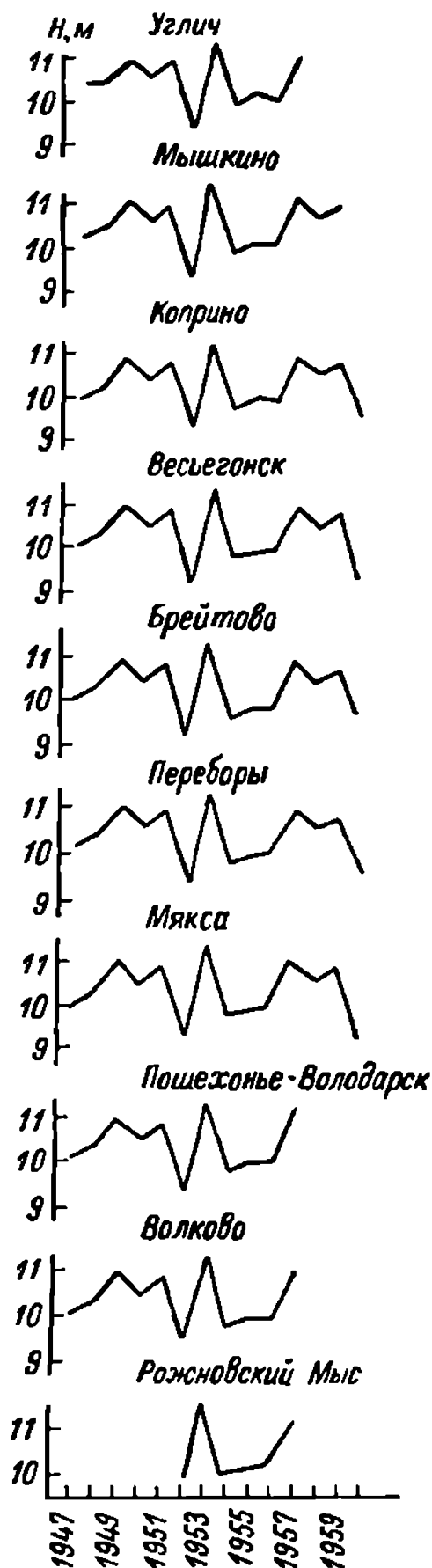


Рис. 36. Многолетний ход уровня в Рыбинском водохранилище.

рость компенсационного течения. Спустя некоторое время наступит динамическое равновесие между прямым и обратным течениями, во время которого и наблюдается наибольшая величина нагона на наветренном берегу и сгона на подветренном.

влияние оказывает режим работы Рыбинской ГЭС. В зависимости от последнего уровень водохранилища от г. Рыбинска до г. Ярославля испытывает резкие колебания. Амплитуда суточных колебаний уровня у Рыбинска превышает иногда 1.5 м. С удалением от Рыбинской ГЭС вниз по течению влияние ее на колебания уровня постепенно уменьшается и у Костромы ритмичность работы Рыбинской ГЭС проявляется лишь в виде небольших, но отчетливо заметных колебаний уровня около отметки НПУ. Согласно исследованиям Б. И. Фелицина (1956), суточные колебания уровня в практически ощутимых размерах в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС распространялись на расстояние около 120 км. Естественно, что подпор от Горьковской плотины уменьшил в известной степени как амплитуду суточных колебаний уровня на этом участке, так и распространение их по течению, но все же они прослеживаются на значительном расстоянии.

Уровень озерной части водохранилища находится под преимущественным воздействием режима работы Горьковской ГЭС. По наблюдениям К. К. Эдельштейна, граница между зонами влияния Рыбинской и Горьковской ГЭС зимой 1961 г. находилась вблизи г. Плеса, а зимой 1962 г. в районе г. Кинешмы. На приплотинном участке водохранилища в период его наполнения и сработки отмечаются продольные уклоны уровня. Так, по данным Волжской гидрометеорологической обсерватории, падение уровня между г. Юрьевцем и сел. Урковым в 1958 г. по среднемесячным величинам составляло 7 см, а по максимальным значениям — 13 см. Помимо продольных уклонов уровня в навигационный период, сильные и устойчивые ветры над акваторией водохранилища могут вызывать сгонно-нагонные колебания уровня. Амплитуда таких колебаний обычно составляет 10—15 см, но в отдельных случаях достигает 30—40 см (Материалы наблюдений на Горьковском водохранилище, 1963). Сгонно-нагонные явления на водохранилище наиболее ощутимо проявляются у г. Юрьевца, а также на устьевых водомерных постах дер. Лубяны и сел. Кобылино.

Отличительной особенностью уровня режима Горьковского водохранилища по сравнению с Рыбинским является относительное постоянство уровня в период открытой воды и небольшая сработка зимой.

На примере Горьковского водохранилища нами прослежен процесс изменения уровня водоема в период его заполнения. С перекрытием Волги у г. Городца уровень приплотинного участка стал быстро повышаться и с октября по декабрь 1955 г. увеличился у г. Чкаловска на 6.5 м. По длине водохранилища этот подъем уровня прослеживался

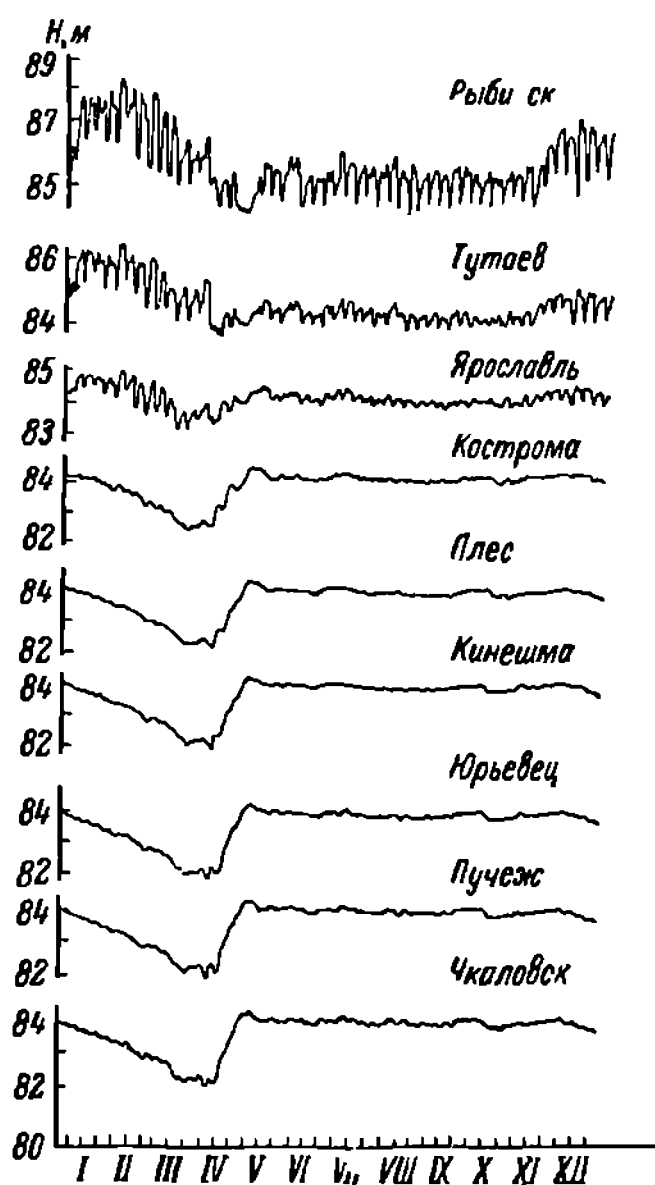


Рис. 38. Совмещенный график годового хода уровня в различных пунктах по длине Горьковского водохранилища.

Влияние естественной межени у этого пункта составило 3,4 м

Длительность периода 1955 г. отметки, по чкаловскому водомерному посту, 819 уроен в январе—марте 1956 г. испытывал небольшие колебания, сохраняя тенденцию к повышению до последней декады марта. Со второй половины апреля начался интенсивный подъем уровня, продолжавшийся до середины мая. С 15 апреля по 13 мая уровень у г. Чкалова повысился на 5,6 м и достиг максимальной для 1956 г. отметки. Спад уровня происходил значительно медленнее, чем подъем, и продолжался до конца июня. За это время уровень понизился примерно на 1,5 м. В летние месяцы он не испытывал больших колебаний, имея общую тенденцию к повышению. К концу октября летне-осеннее повышение уровня достигло наибольшего значения — почти максимальной отметки 1956 г. Понизившись в первых числах

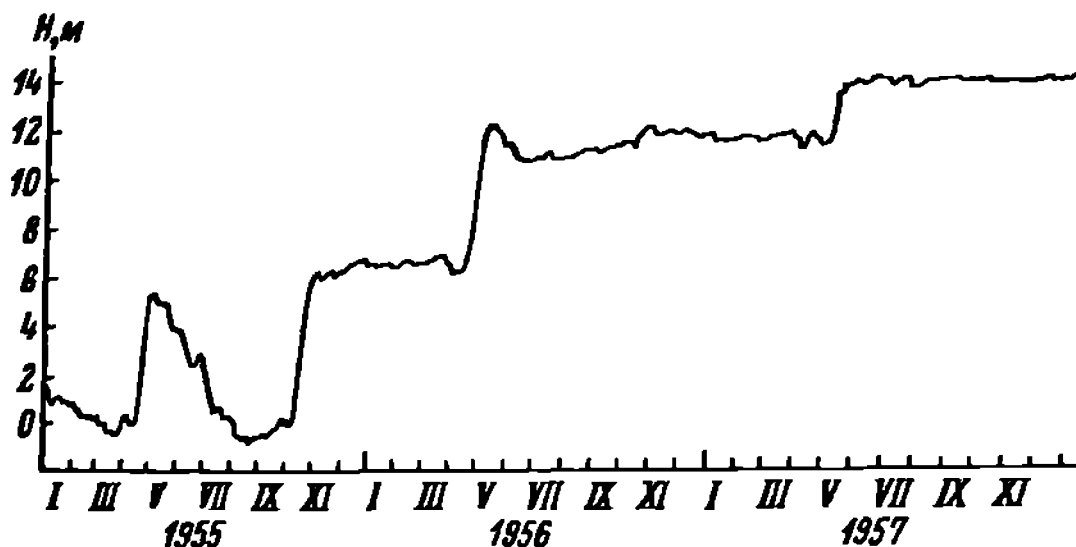


Рис. 39. Изменение уровня Горьковского водохранилища в годы его заполнения.

ноября на 0,5 м, уровень до конца года колебался около этой отметки. Таким образом, годовая амплитуда колебаний уровня за 1956 г. по чкаловскому водомерному посту была равна 6,1 м, а общее превышение уровня при максимальной отметке над меженим уровнем 1955 г. составляло 13 м.

Тенденция к понижению уровня сохранилась и в начале 1957 г. Незначительное повышение в середине марта сменилось в конце марта—начале апреля резким падением. Так, с 25 марта по 5 апреля уровень у Чкаловска понизился на 0,75 м, и 5 апреля наблюдался самый низкий в году уровень в водохранилище. После резкого понижения в начале апреля в середине месяца наблюдался такой же интенсивный подъем уровня. Таким образом, изменения уровня с января по май 1957 г. были несколько иными, чем за то же время в 1956 г.

Весенний подъем в 1957 г. продолжался примерно до середины июля, после чего уровень водохранилища практически достиг проектной отметки. Наиболее интенсивное повышение его (на 2,5 м) наблюдалось с 1 по 20 мая. Достигнув 15 июля отметки, по чкаловскому водомерному посту, близкой к НПУ, уровень стал медленно понижаться и с 15 по 30 июля уменьшился на 0,52 м. Это понижение в конце июля сменилось постепенным повышением в начале августа, и к концу августа уровень снова был близок к проектному. За исключением отдельных повышений и понижений, не превышавших 0,2—0,3 м, он до конца года не испытывал значительных колебаний.

Максимальный уровень в 1957 г., по чкаловскому водомерному посту, превышал отметку НПУ на 5 см (8 X), что относительно межени 1955 г.

составило 15 м, а самого низкого уровня 1956 г. — 8.1 м. Годовая амплитуда уровня за 1957 г. равнялась 3.2 м.

Кривая на рис. 39 показывает, что наиболее резкие изменения уровня в водохранилище происходили в период весеннего наполнения, а в остальное время года колебания его были невелики. После наполнения водохранилища до проектной отметки уровень его стал поддерживаться в соответствии с расчетным графиком сработки и испытывал в течение года описанные выше изменения.

В процессе наполнения водохранилища и повышения его уровня до отметки НПУ произошло изменение режима не только основной реки, но и всех впадающих в зону подпора малых притоков. Они, как правило, стали уже составной частью самого водохранилища, превратившись в обширные заливы с колебаниями уровня воды, характерными для всего водоема. Таких заливов в устьях рек, балках и оврагах, примыкающих к водоему, особенно много образовалось по длине Куйбышевского водохранилища.

Куйбышевское водохранилище, как и Горьковское, рассчитано на сезонное регулирование стока, поэтому особенности режима его уровня те же, что и в Горьковском: ежегодно в период весеннего наполнения уровень повышается до отметки НПУ, а затем в течение всего года срабатывается до заданной отметки. В Куйбышевском водохранилище, как и в других водоемах подобного типа, уровеньный режим на различных участках имеет свои особенности. Так, в период наполнения, особенно в начале его, в ходе уровня в приустьевых участках малых притоков намечаются отклонения от хода уровня в самом водохранилище. Это связано с тем, что начало весеннего подъема уровня на малых реках наступает значительно раньше, чем на основных. В конце зимы в связи с большой сработкой водохранилища многие малые притоки фактически освобождаются (частично или полностью) от его регулирующего влияния и на этих участках водоема наступает естественное для реки изменение уровня.

Общая сработка Куйбышевского водохранилища значительно больше, чем у других водохранилищ волжского каскада. С ноября по апрель уровень понижается в среднем на 5.0—5.5 м (Боровкова и др., 1962). Самое большое понижение отмечается ниже впадения р. Камы.

Колебания уровня в водохранилище, не связанные с изменением запасов воды, обуславливаются прежде всего воздействием ветра. Большая площадь зеркала водохранилища благоприятствует развитию стогнонагонных явлений. По исследованиям Комсомольской гидрометеорологической обсерватории, стогнонагонная, или ветровая децивелляция уровня, как и на большинстве других крупных водоемах, носит характер одноузлового общего перекося: почти всем, даже небольшим подъемам уровня в одних районах соответствует такое же понижение в других.

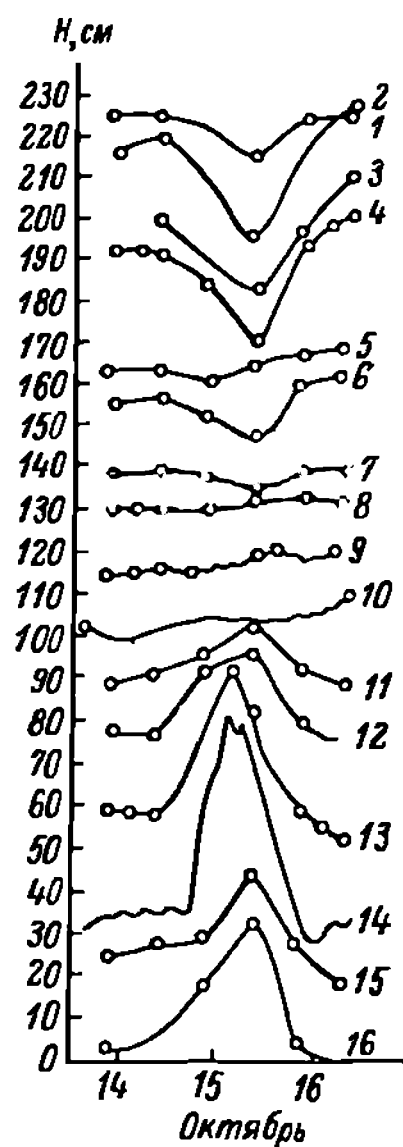


Рис. 40. Совмещенный график колебания уровня Куйбышевского водохранилища во время ветровой децивелляции 14—16 октября 1959 г. (по П. И. Нвкулпу, 1962).

1 — Чебоксары; 2 — Вязовые; 3 — Верхний Услон; 4 — Красновидово; 5 — Кирельское; 6 — Камское Устье; 7 — Тетюши; 8 — Архангельское; 9 — Старая Майна; 10 — Городище; 11 — Ульяновск; 12 — Белый Яр; 13 — Новодевичье; 14 — Климовка; 15 — Ябловый овраг; 16 — Тольятти.

Так, подъему уровня в районе городов Тольятти и Сенгилея соответствует понижение его в районе сел Верхний Услон и Вязовые (рис. 40). В то же время в районе сел. Архангельского, примерно в средней части водохранилища, заметных колебаний уровня не наблюдается.

Особенно значительные сгонно-нагонные колебания уровня с большим ветровым перекосом поверхности водоема отмечаются в Куйбышевском

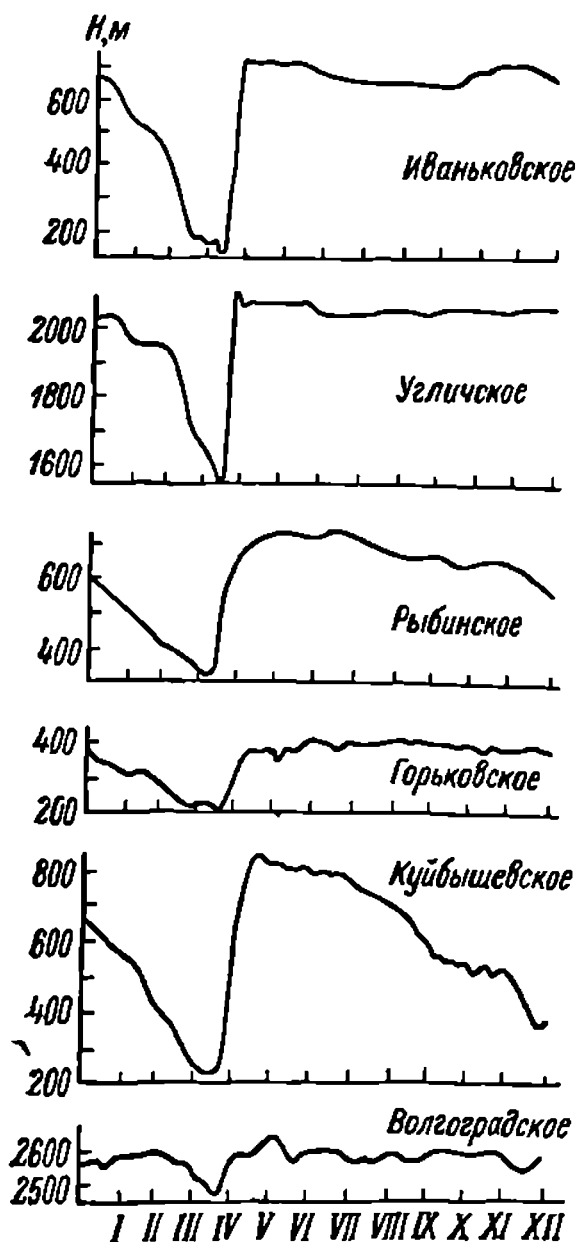


Рис. 41. Совмещенный график годового хода уровня в водохранилищах волжского каскада.

осенью и зимой, а в некоторых водохранилищах уже со второй половины лета; минимальными отметками в предполоводный период (рис. 41). Однако в зависимости от формы хозяйственного использования водных ресурсов водохранилищ характер изменения уровня в них может быть различным. В одних случаях он определяется выработкой необходимого количества электроэнергии, в других — навигационными попусками или запросами сельского хозяйства. В результате уровеньный режим водохранилищ существенно отличается от режима озер, расположенных в той же климатической зоне.

Волновые процессы в водохранилищах

Волнение в водоеме есть следствие сложного взаимодействия комплекса разнообразных факторов: силы и продолжительности ветра, его устойчивости, величины разгона, размеров и конфигурации водоема, его глубины и некоторых других. В зависимости от конкретных условий

водохранилище при сильных северных ветрах. При ветрах этого направления в районе г. Тольятти в результате нагона уровень повышается на 80—90 см, а в верхней части водохранилища понижается на 30—40 см вследствие сгона воды, создавая, таким образом, перекося водной поверхности между верхними участками и приплотинным районом в 1 м и более (Борова и др., 1962). При сложной конфигурации водохранилища очень часто на отдельных участках возникают местные сгонно-нагонные колебания уровня.

Значительно проще режим уровня в Волгоградском водохранилище. При работе Волгоградской ГЭС практически на транзитной воде уровень в нем, как правило, поддерживается на отметке НПУ, а при относительно простой конфигурации этого водоема значительных ветровых денивелиаций не наблюдается.

Таким образом, почти у всех водохранилищ волжского каскада режим уровней характеризуется следующими общими чертами: сравнительно быстрым подъемом в начале половодья; наиболее высоким положением в конце половодья и в течение последующего времени; неодинаковой по продолжительности и срокам, но относительно равномерной и сравнительно медленной сработкой, осуществляемой обычно

те или иные факторы проявляются в различной степени. Так, в открытом море влиянием глубины и конфигурации берегов на волновой режим можно пренебречь, тогда как во внутренних водоемах указанные факторы проявляются с особой силой. На примере Рыбинского водохранилища это хорошо показано в работах А. А. Иванова (1948), С. П. Левченко (1949), А. П. Браславского (1952), Е. М. Селюк (1959), В. Б. Ваисбанда (1959) и др.

Данные исследования позволяют составить общее представление о характере волновых процессов и их особенностях по акватории водохранилищ. Установлено, что характер волнения на водохранилищах существ-

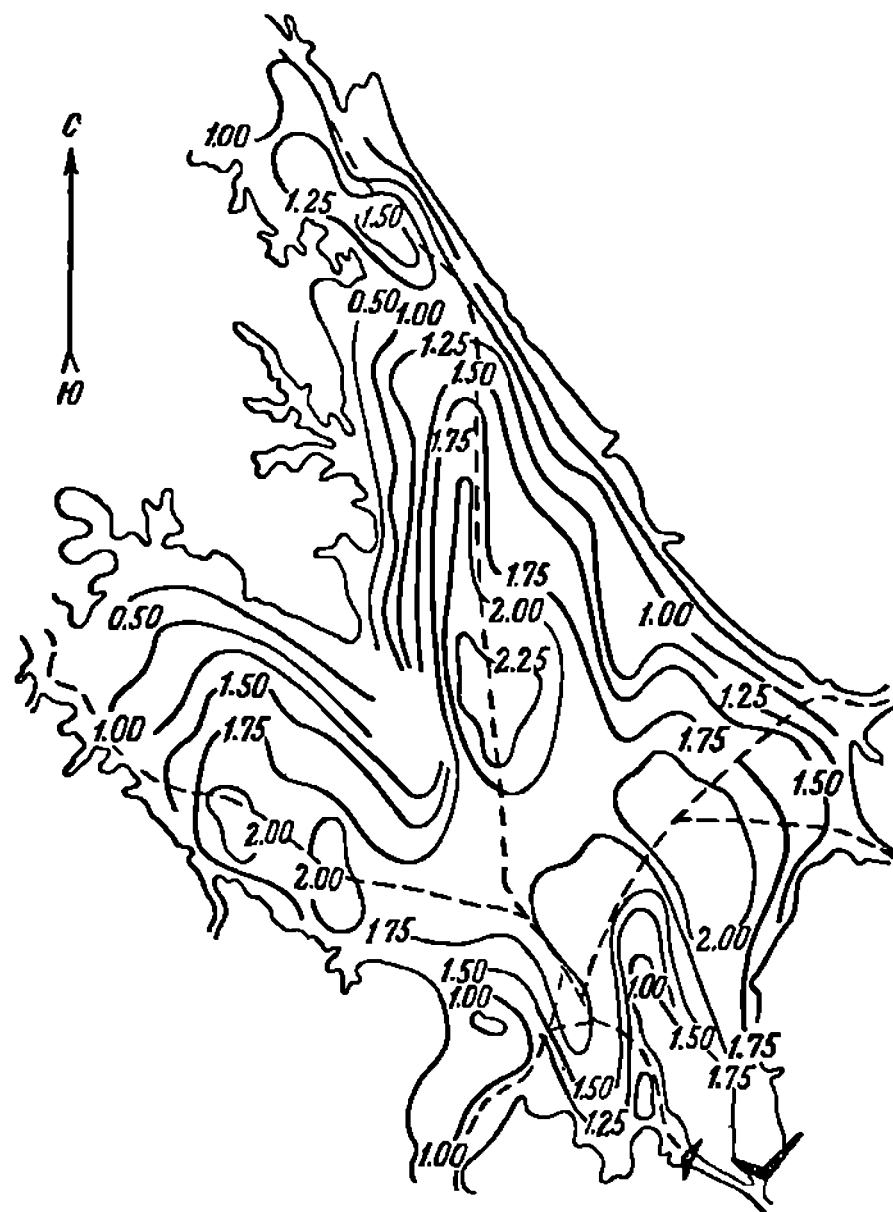


Рис. 42. Картограмма изолиний высот волн (в м) в Рыбинском водохранилище (по Е. М. Селюк, 1959).

венно отличается от характера волнения на морях и на больших озерах. Волны на водохранилищах отличаются от морских и озерных по высоте, длине и крутизне. Волнение на водохранилищах, как правило, трехмерное. Оно характеризуется небольшой длиной волны по фронту. Подветренный склон волны бывает круче, чем наветренный. Характер волнения существенно меняется не только во времени, но и в пространстве.

Сложность волнового режима водохранилищ состоит в том, что у каждого из них в зависимости от площади, глубины и конфигурации существуют свои пределы усиления волнения и образования максимальных волн. Кроме того, в связи с неоднородностью ветровых процессов в течение навигационного периода значительно меняется и волновая характеристика того или иного водоема.

Некоторые особенности волновых процессов в искусственных водоемах мы рассмотрим на примере двух водохранилищ различного типа — Рыбинского и Куйбышевского. При большой площади зеркала этих водо-

хранилищ волновые процессы в них выражены более четко, чем в других водохранилищах волжского каскада, а морфометрические особенности их позволяют проследить специфику волнения в водоемах различного типа.

Поскольку ветровая волна на водохранилищах формируется в основном под действием ветра, то наибольший интерес представляет режим волнения на водоеме при характерных направлениях ветра. Наиболее наглядное представление о пространственном распределении волнения на водоеме при определенных направлениях и скоростях ветра дают картограммы изолиний высот волн. Такая картограмма для Рыбинского водохранилища, составленная Е. М. Селюк (1959), представлена на рис. 42. Из нее видно, что наибольшие высоты волн при северном направлении ветра и скорости его около 18 м/сек. отмечаются в районе затопленных долин Шексны и Мологи (на отдельных участках высота волны достигает 2 м и более). С приближением к району междуречья и берегам высоты волн заметно уменьшаются, что указывает на зависимость высоты волны в Рыбинском водохранилище от рельефа дна водоема.

Как указывает Е. М. Селюк (1959), подобное пространственное распределение волнения на водохранилище сохраняется и при ветрах северо-западного и юго-восточного направлений. При ветрах этих направлений районами наиболее интенсивного волнения оказываются также затопленные долины Шексны и Мологи. В зависимости от скорости ветра может заметно изменяться лишь высота волны. Так, при ветре указанных направлений и скорости его 18 м/сек. высота волны в указанных районах достигает 1.70—1.75 м, а при скорости 9 м/сек. она уменьшается до 0.9 м. С изменением направления ветра пространственное распределение волнения может стать отличным от приведенного на рис. 42. При ветрах северо-восточного и юго-западного направлений район повышенного волнения охватывает не только затопленные долины Шексны и Мологи, но частично распространяется на междуречье. При данных направлениях ветра два очага повышенной волновой активности, расположенные по Шексне и Мологе, объединяются в один, захватывая при этом и междуречье. Максимальные высоты волн при однозначных скоростях ветра сохраняются такими же, как и при ветрах северо-западного и юго-восточного направлений.

Высоты волн в центральной части Рыбинского водохранилища довольно устойчивы. Максимальная высота, наблюдавшаяся при сильных штормовых ветрах, превышала 2.5 м. На открытых глубоководных акваториях затопленных долин Шексны и Мологи значительное волнение с максимальной высотой волн 0.5—0.6 м развивается обычно уже при ветре 6—7 м/сек., а при увеличении скорости ветра до 16—18 м/сек. высота волны достигает своего максимального значения — 2 м.

Некоторые характерные особенности волновых процессов в Рыбинском водохранилище выявлены А. А. Ивановым (1948). По его данным, отношение величины длины волны к ее высоте в Рыбинском водохранилище резко меняется при скорости ветра 5.8 м/сек. и выше, и в этом случае средняя длина волны равняется 3 м, а максимальные ее значения достигают 4.6 м.

Характер волнения на Куйбышевском водохранилище существенно отличается от характера волнения на Рыбинском. Высокие склоны долины Волги, более сложная конфигурация водоема при большой площади зеркала водохранилища создают своеобразный волновой режим. На некоторых участках водохранилища при одном и том же направлении ветра могут одновременно наблюдаться волны нескольких систем (основные, отраженные и дифракционные), а вблизи отвесных берегов — стоячие (Боровкова и др., 1962).

■

По условиям формирования волн П. И. Никулин (Боровкова и др., 1962) разделяет Куйбышевское водохранилище на три характерных участка: озеровидные плесы; длинные узкости, ограниченные высокими берегами; районы узких речных долин притоков и хорошо разработанных оврагов. Каждому из этих участков свойственны особые условия развития волнения. На большей части водохранилища наибольшее волнение создается ветрами, по направлению совпадающими с продольной осью водоема. Только на участке Ульяновск—Старая Майна, в верхнеульяновском озеровидном плесе и в устье Камы большое волнение могут вызывать ветры всех направлений.

Поскольку ветровой режим в районе Куйбышевского водохранилища характеризуется сезонной изменчивостью, то такую же изменчивость имеет и режим волнения. Летом, как правило, сильное волнение наблюдается редко, а к осени повторяемость его резко возрастает.

Одной из важнейших характеристик ветрового волнения является величина максимальной волны. Согласно расчетам П. Ф. Чигиринского и Н. В. Колобова, высота максимальной волны на главном судовом ходе Куйбышевского водохранилища, но в разных его участках может колебаться от 0 до 3.4 м. Возникновение в условиях Куйбышевского водохранилища волн значительной величины подтверждается материалами наблюдений (табл. 39). Так, во время шторма 25—31 октября 1958 г. в районе сел. Городище при ветре со скоростью 22 м/сек. зарегистрирована высота волны 3.2 м.

Максимальная высота волн на Куйбышевском водохранилище по данным прибрежных наблюдений за 1957—1960 гг.
(по П. И. Никулину, 1958)

Пункт	Волнение			Ветер			Волнение			Ветер			Волнение			Ветер		
	Высота, м		дата	направление		скорость, м/сек.	Высота, м		дата	направление		скорость, м/сек.	Высота, м		дата	направление		скорость, м/сек.
	1957	1958	1959	1960	1957	1958	1959	1960	1957	1958	1959	1960	1957	1958	1959	1960	1957	1960
г. Тольятти	19 X	1.4	ЮЗ	15	6 VII	1.1	ЮЗ	8	26 X	1.1	Ю	14	3 X	1.9	ЮЮЗ	14		
Сел. Усолье	3 VII	1.5	ССВ	12	21 X	2.1	ССВ	20	15 X	2.0	С	18	2 X	2.3	З	16		
Сел. Хрящевка	9 IX	1.1	ЗСЗ	12	25 XI	3.0	СЗ	16	15 X	3.0	СЗ	18	21 X	1.5	В	16		
Белый Яр	9 IX	2.5	СЗ	18	24 XI	2.5	ЗСЗ	16	9 X	1.5	ЗСЗ	24	17 X	2.9	ЗЮЗ	16		
Ульяновск (остров)	11 VIII	2.0	З	14	29 X	2.1	С	18	19 VII	1.0	СЗ	14						
Плавучая станция ПОМ-1									17 IX	2.3	Ю	18	28 X	2.6	ЮЮЗ	14		
Сел. Городище	24 IX	1.6	ЮВ	12	28 X	2.0	ЮВ	22	30 IX	1.5	СВ	14	28 X	1.6	ЮЮВ	14		
Тетюши (остров)	9 X	1.4	ССЗ	14	19 IX	2.0	СЗ	15	12 IX	1.3	ЗЮЗ	16	28 VI	1.2	СВ	14		
г. Лаишево	27 IX	1.3	ЮЗ	12	19 IX	1.5	Ю	13	23 IX	1.3	Ю	12	7 VII	0.9	ВЮВ	10		
Рыбная Слобода	27 IX	1.1	ЮЮЗ	16	14 V	1.3	ЮЗ	18	22 VI	0.8	ЮЮЗ	12	4 VIII	0.6	ЮЗ	12		

В значительных пределах изменяются и другие параметры волн. По данным П. И. Никулина (Боровкова и др., 1962), наибольшая длина волны, зарегистрированная в 1958 г. у г. Тольятти, равнялась 25 м. У Гетюшского острова волна высотой 0.6 м имела длину 10 м, а при высоте волны порядка 1 м длина ее достигала уже 18 м. Заметно изменяется также и период волн. При высоте волны около 1 м средний период волн у сел. Новодевичье колебался от 2.2 до 3.1 сек., у сел. Усолье — от 2.7 до 3.1 сек., а у сел. Красновидова — от 1.6 до 2.1 сек. В больших пределах колеблется и скорость распространения ветровых волн. В районе г. Тольятти при ветре юго-западного направления со скоростью 12.7 м/сек., средняя скорость распространения волн равнялась 2.6 м/сек., наибольшая — 7.8 м/сек., а наименьшая — 0.6 м/сек. Естественно, что при сложной конфигурации водохранилища на его отдельных участках параметры волн могут значительно отличаться как от расчетных величин, так и от указанных выше значений.

При определенных направлениях ветра сильно волнение наблюдается и в озерной части Горьковского водохранилища. Так, на волномерных постах Сокольское и Чкаловск при ветрах северного направления зарегистрированы волны высотой 1.8—2.2 м, а расчетные данные, полученные Волжской гидрометеорологической обсерваторией, предполагают и большую высоту волны в этих районах вдоль волжского судового хода при ветрах северного и северо-западного направлений.

Аналогичная картина наблюдается на Волгоградском водохранилище. На отдельных его участках длина разгона волн достигает 50—60 км и расчетная высота их при скорости ветра 15 м/сек. составляет 2.3 м. В летне-осенний период такие ветры редки, но все же в отдельные годы число штормов значительно — около 50. Иногда наблюдаются ветры ураганной силы. Так, 11 ноября 1952 г. в районе Волгограда зарегистрирован ветер, скорость которого достигала 34 м/сек.

Таким образом, на большинстве волжских водохранилищ при отсутствии ледяного покрова может развиваться интенсивное ветровое волнение. Характерной особенностью ветрового волнения на водохранилищах является относительно большая по сравнению с морскими крутизна волны. Крутизна волны на море обычно не превышает 1:20, а волна с крутизной 1:13 бывает крайне редко (Иванов, 1948). На крупных водохранилищах крутизна волны колеблется от 1:5 до 1:7 для средних и невысоких волн и от 1:12 до 1:15 для самых высоких волн (Вендров, 1955). В отличие от крутизны период волн на водохранилищах значительно меньше периода морских волн: средняя величина периода для низких волн равняется 2—3 сек., а для высоких — 4—5 сек.

Волновые процессы на водохранилищах протекают на фоне значительных сезонных и годовых колебаний уровня, в связи с чем приведенные величины элементов волн могут существенно меняться.

Течения в водохранилищах

Роль течений в гидрологическом режиме водохранилищ, как и других водоемов, весьма существенна. Они переносят водные массы в водоеме, способствуют перемешиванию вод и создают благоприятные условия для развития организмов от поверхности до дна, существенно влияют на гидрохимический режим водоема, определяют и направляют процессы илонакопления.

Искусственное регулирование объема водной массы, форма и морфометрия водохранилищ обуславливают сложную систему течений в них, но преобладающими являются стоковые. Стоковые течения возникают в результате наклона уровенной поверхности водоема, вызванного из-

бытком воды, приносимой притоками, или недостатком ее в той или иной части водоема (Буторин и Литвинов, 1963б). Иначе говоря, эти течения обычно связаны с изменением объема водной массы водохранилища и характеризуют интенсивность водообмена.

При зарегулировании стока реки характер течений в ней резко меняется. Скорости течения в зоне распространения подпора уменьшаются, в известной степени теряется устойчивость направления течений. Появляются течения конвективного и ветрового происхождения. Изменение скоростного режима реки при зарегулировании стока прослежено нами на примере Волги в районе Горьковского и Куйбышевского водохранилищ (Буторин, 1958а, 1958б, 1958в, 1963б).

Как показали результаты измерений, с первых же дней наполнения водохранилищ проточность в районе их по сравнению с рекой резко упала. Так, средние скорости течения на приплотинном участке Горьковского водохранилища, полученные спустя три недели после начала наполнения его, резко отличались от значений этих скоростей, измеренных до создания водохранилища. В районе городов Пучежа и Городца они изменялись от 0.15 до 0.22 м/сек. и не превышали 0.28 м/сек. Зимой 1955-56 г. отмечалось дальнейшее уменьшение скорости течения на приплотинном участке водохранилища. Средние скорости на тех же вертикалях изменялись от 0.06 до 0.10 м/сек., причем максимальные скорости наблюдались на глубине 0.4 м.

Сопоставляя имеющиеся по скоростному режиму водохранилища данные с результатами измерения скоростей течения реки до ее зарегулирования, выполненного экспедицией Горьковского университета в летнюю межень 1953 г., мы находим, что уже в ноябре 1955 г. при поднятии уровня только на 3.0—3.5 м средняя скорость потока на Чкаловском створе уменьшилась на 73%, а на Пучежском — на 67%. При дальнейшем поднятии уровня произошло новое уменьшение скоростей течения: летом 1956 г. скорость течения по сравнению с летом 1953 г. уменьшилась на Чкаловском створе на 90%, на Пучежском — на 75%, на Юрьевоцком — на 80% и у г. Кинешмы — на 50% (табл. 40).

Таблица 40

Средние и наибольшие скорости течения (в м/сек.) по вертикали на створах Горьковского водохранилища в навигационный период 1956 г.

Дата	Г. Чкаловск		Г. Пучеж		Г. Юрвец		Г. Кинешма		Средний уровень по чкаловскому водомерному посту, см
	среднее	наибольшее	среднее	наибольшее	среднее	наибольшее	среднее	наибольшее	
20—25 V	—	—	0.27	0.31	0.24	0.29	—	—	1436
5—6 VI	—	0.25	0.21	0.29	0.18	0.21	—	—	1368
30 VI	—	—	—	—	—	—	0.23	0.28	1328
6—14 VII	—	—	—	—	0.15	0.18	0.26	0.30	1346
20—22 VII	—	—	0.09	0.11	0.13	0.15	0.22	0.27	1331
22—27 VIII	0.067	0.07	0.14	0.28	0.29	0.29	—	—	1364
15—18 IX	—	—	0.14	0.15	0.10	0.12	0.15	0.19	1376

Уже в годы заполнения водохранилищ весьма своеобразный режим скоростей наблюдался и в верхних бьефах ГЭС. Это хорошо видно по материалам суточных станций, выполненных нами в августе 1956 и 1957 гг. в верхнем бьефе Горьковской ГЭС (табл. 41). Суточная станция 3—4 августа 1956 г. была выполнена при отметке уровня по чкаловскому водомерному посту 1333—1336 см. Измерение скорости течения производилось с помощью морской вертушки с облегченной лопастью. Наблюдения были начаты при слабом юго-восточном ветре, скоростью 1.3—1.4 м/сек., создающем на поверхности водохранилища легкую зыбь. В ходе наблю-

Т а б л и ц а 41

Скорости течения (в м/сек.) на суточных станциях
в верхнем бьефе Горьковской ГЭС

Горизонт наблюде- ний, м	9 VIII 1956				4 VIII 1956				
	13 час.	16 час.	19 час.	22 час.	1 час.	4 час.	7 час.	10 час.	13 час.
0.5	—	—	0.05	0.04	0.02	0.05	—	—	—
2.9	0.08	0.07	0.07	0.07	0.05	0.05	0.08	0.10	0.12
5.8	0.07	0.08	0.08	0.06	0.11	0.08	0.07	0.17	0.17
8.7	0.06	0.07	0.08	0.07	0.08	0.09	0.18	0.19	0.20
11.6	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.15	0.14	0.20

Т а б л и ц а 41 (продолжение)

Гори- зонт наблю- дений, м	9 VIII 1957				10 VIII 1957								
	18 час.	20 час.	22 час.	24 час.	2 час.	4 час.	6 час.	8 час.	10 час.	12 час.	14 час.	16 час.	18 час.
3.0	0.20	0.18	0.19	0.18	0.20	0.18	0.19	0.22	0.22	0.24	0.23	0.25	0.20
5.0	0.15	0.19	0.23	0.19	0.20	0.18	0.20	0.18	0.19	0.26	0.16	0.16	0.19
10.0	0.13	0.25	0.26	0.14	0.20	0.14	0.18	0.15	0.20	0.26	0.25	0.16	0.22
15.0	0.33	0.20	0.30	0.16	0.23	0.23	0.13	0.20	0.19	0.22	0.20	0.16	0.16
18.0	0.10	0.18	0.37	0.18	0.16	0.25	0.18	0.14	0.20	0.21	0.19	0.16	0.20

дений ветер, сохраняя направление, постепенно усиливался и к концу наблюдений скорость его достигла 6.3 м/сек., а волнение увеличилось до 4 баллов. Как видно из табл. 41, на всех горизонтах наблюдений было зафиксировано течение, скорость которого в ходе суток колебалась в значительных пределах.

В августе 1957 г. в этом же районе была выполнена повторная суточная станция при отметке уровня по чкаловскому водомерному посту 376—382 см. Измерение скорости течения производилось той же самой вертушкой, что и в 1956 г., при сильном порывистом ветре северо-западного направления, скорость которого в течение суток колебалась от 8.7 до 12.9 м/сек. Волнение было порядка 4—5 баллов. Данные этой станции подтвердили результаты наблюдений 1956 г. Как и в 1956 г., течение прослеживалось по всей глубине потока, за исключением поверхностного 3-метрового слоя, где оно искажалось волнением. Величины скорости потока в течение суток на различных горизонтах представлены в табл. 41. Такое увеличение скорости потока с приближением к ГЭС и ее изменение в течение суток обуславливается режимом работы гидростанции. В зависимости от него она может колебаться в широких пределах.

Многолетние исследования волжских водохранилищ показали, что все они обладают большей или меньшей проточностью. На существование проточности в Иваньковском и Угличском водохранилищах в зимний период указывали еще Б. М. Себенцов и др. (1940). Скорость движения воды в Иваньковском водохранилище на участке между Шошей и Созью, по их данным, равнялась 0.1 м/сек. и была вычислена путем определения скорости перемещения воды, лишенной кислорода. Инструментальные наблюдения Института биологии внутренних вод АН СССР в 1957 и 1958 гг. установили существование проточности в Иваньковском водохранилище как в зимний период, так и летом. По данным табл. 42 видно, что зимой в Иваньковском водохранилище у г. Конакова скорость течения

Скорости течения (в м/сек.) в Иваньковском водохранилище

Станция	Дата	Время наблюдений, час. мин.	Горизонт наблюдений, м									
			поверхность	2-3		4-5	6	7	8-9	10-12	15-16	20-22
1955 г.												
Верхний бьеф Иваньковской ГЭС	15 V	15 00	0.08	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1957 г.												
Омутинский ход	18 V	07 40	0.06	0.06	—	—	—	—	—	—	—	—
Корольский ход	18 V	09 20	0.08	0.08	—	—	—	—	—	—	—	—
Харинский ход	18 V	12 05	0.09	0.09	—	—	—	—	—	—	—	—
Перетрусинский залив	18 V	14 20	0.05	0.07	—	—	—	—	—	—	—	—
О. Грабиловка	18 V	17 25	0.06	0.04	—	—	—	—	—	—	—	—
Устье р. Созь	19 V	08 50	0.07	—	—	—	—	—	—	0.04	—	—
Р. Созь (2 км от устья)	19 V	07 15	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Г. Конаково	16 V	08 00	0.17	—	—	—	—	—	—	—	—	—
»	26 II	15 30	0.08	—	0.09	0.08	0.07	0.05	—	—	—	—
»	19 V	11 50	—	0.06	—	0.06	0.06	—	—	—	—	—
»	11 VII		0.16	—	—	—	—	—	—	—	—	—
»	10 III	12 00	—	0.08	0.09	—	—	—	—	—	—	—
Дер. Терехово	20 V	07 25	—	0.07	—	0.10	0.08	—	—	—	—	—
»	11 VII		—	0.15	—	—	—	—	—	0.14	—	—
»	8 VIII	16 45	—	0.13	—	—	—	—	—	0.08	—	—
Р. Шола (у Безбородовского моста)	29 III	15 30	0.10	0.12	0.09	—	—	—	—	—	—	—
То же	20 V	09 45	—	—	—	—	—	0.05	—	—	—	—

была порядка 0.06—0.08 м сек. Вверх от плотины она постепенно увеличивалась и в Шошинском плесе равнялась 0.09—0.12 м сек. Наиболее значительные скорости течения зимой отмечались на верхневолжском участке водохранилища. Так, в марте 1958 г. максимальная скорость течения у дер. Слободы равнялась 0.16 м сек. Увеличиваясь вверх по течению, она достигала у дер. Мигалово 0.41 м сек. При этом, если у г. Конакова течение обнаруживалось только на половине глубины, то на рассматриваемом участке оно прослеживалось по всей глубине от нижней кромки льда до дна (Буторин, 1959в).

Весной на приплотинном участке Иваньковского водохранилища скорость течения на поверхности обычно не превышает 0.05—0.06 м сек. Подобные скорости наблюдались в Обуховском, Федоровском и Перетуровском заливах этого участка и сохранялись вплоть до Шошинского плеса, в котором весной скорость течения вертушкой не улавливалась (рис. 43).

Регистрация скорости и направления течения самописцами БПВ-2-р в верхнем бьефе ГЭС и на правом склоне русла Волги у сел. Городища в июле 1963 г. показала, что элементы течения в этих районах резко меняются. Так, в верхнем бьефе ГЭС скорость на горизонте 2.5 м в отдельные сроки наблюдений достигала 0.14—0.16 м сек., тогда как в течение продолжительных промежутков времени она была на пределе чувствительности прибора и не превышала 0.03 м сек. (рис. 43, а).

С удалением от плотины скорость течения заметно уменьшается и у Городища она, как правило, не превышает 0.07 м/сек. (рис. 43, б). С уменьшением скорости течения уменьшается и устойчивость потока по направлению. Если у плотины отчетливо прослеживается перемещение водной массы в сторону ГЭС, то у Городища вполне определенного переноса вод не наблюдается (табл. 43).

Таблица 43

Повторяемость в направлении переноса водных масс в верхнем бьефе Иваньковской ГЭС и у сел. Городища 11—15 июля 1963 г.

Пункт наблюдения	Дата	ЗСЗ	С	ССВ	ВСВ	ВЮВ	ЮВ	ЮЮВ
Верхний бьеф ГЭС Сел. Городище . . .	11—13 VII	3	1	3	8		16	4
	13—15 VII	4	—	1	—	5	—	2

Таблица 43 (продолжение)

Пункт наблюдения	Дата	З	ЗЮЗ	СЗ	ССЗ	ЮЮЗ	СВ	В
Верхний бьеф ГЭС Сел. Городище . . .	11—13 VII	7	—	—	—	—	—	—
	13—15 VII	2	8	1	3	2	1	9

У г. Конакова скорость течения вновь увеличивается и в поверхностном слое достигает 0.16 м/сек., а на траверзе дер. Терехово — 0.15 м/сек. Заметное увеличение скорости наблюдается в зоне выклинивания подпора. Так, в русле Волги у дер. Малые Перемерки скорость на поверхности 7 июля 1957 г. составляла 0.38 м/сек., а у дер. Мигалово — 0.40 м/сек.

Таким образом, в Иваньковском водохранилище как зимой, так и летом наблюдаются заметные скорости течения, причем четко прослеживается возрастание скоростей по длине водохранилища к зоне выклини-

вания подпора. Наиболее отчетливо течение проявляется по русловым участкам рек.

Значительные скорости течения наблюдаются и в Угличском водохранилище. На большие скорости в нем весной указывают величины уклона водной поверхности в водохранилище. Так, по данным Т. Н. Курдиной (1959), средний уклон водной поверхности на участке Кимры—Калязин весной равнялся 0.03‰ , а на участке Калязин—Углич 0.02‰ . В другие сезоны уклоны на обоих участках уменьшаются, но не исчезают и, как следствие их, течение сохраняется. Это подтверждается прежде всего данными эпизодических наблюдений над течениями в различных участках водохранилища (табл. 44).

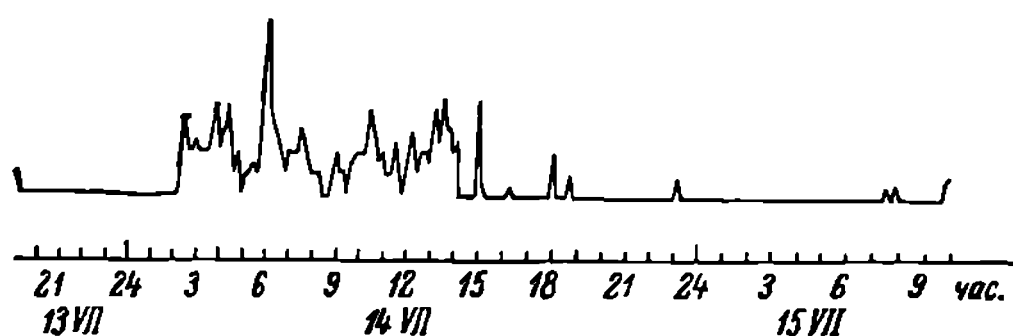
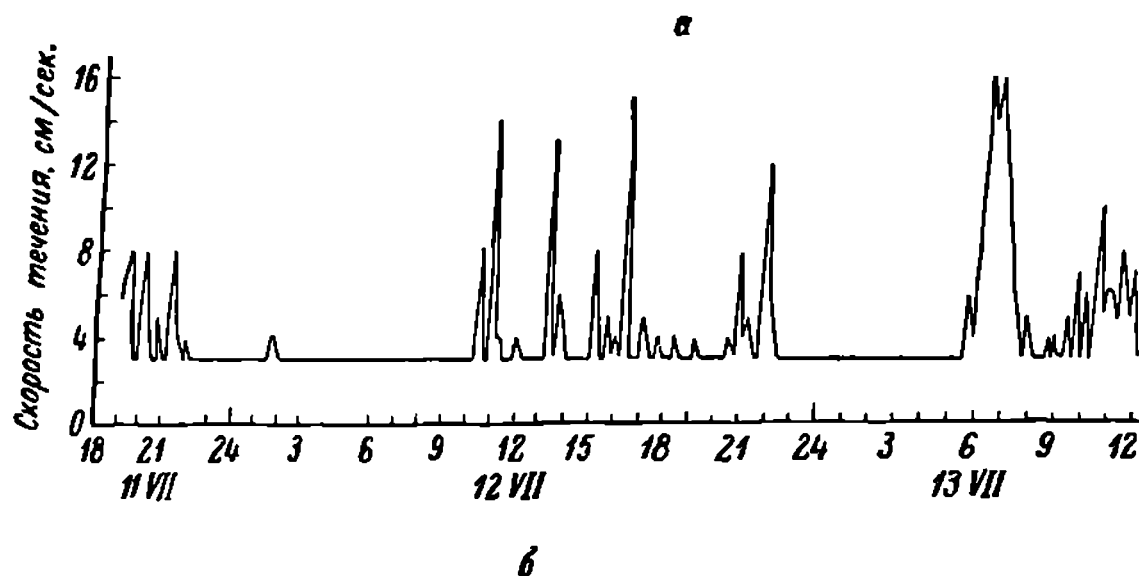


Рис. 43. Изменение скоростей течения в Ивановском водохранилище в июле 1963 г.

а — верхний бьеф Ивановской ГЭС; б — сел. Городнице.

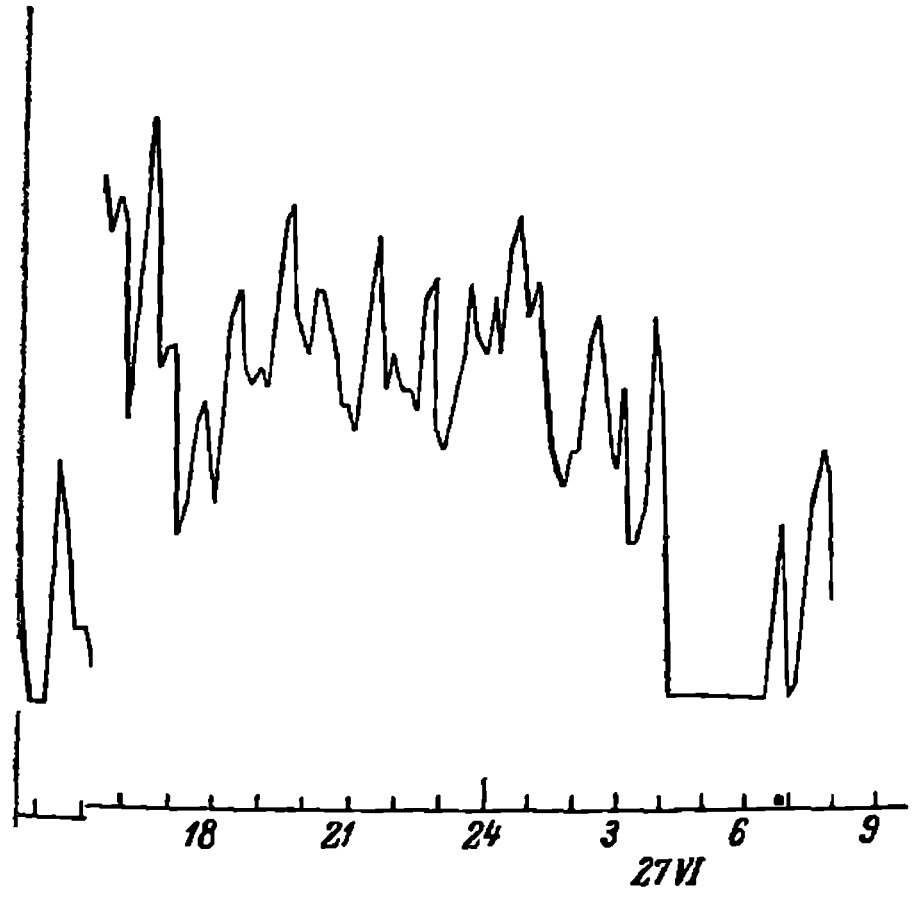
Из табл. 44 видно, что в мае 1957 г. в верхнем бьефе Угличской ГЭС скорость течения на поверхности равнялась 0.20 м/сек. , а на глубине 9.0 м достигала 0.25 м/сек. С удалением от плотины она заметно уменьшалась и на траверзе устья р. Медведицы не превышала 0.07 м/сек. Только в нижнем бьефе Ивановской ГЭС скорость на поверхности снова увеличивалась до 0.27 м/сек. В отдельные годы в зависимости от водности и режима работы Угличской и Ивановской ГЭС распределение скоростей течения в водохранилище, особенно весной, может быть иным. Так, в мае 1955 г. при непрерывном сбросе паводковых вод через Ивановскую плотину скорость течения по всему Угличскому водохранилищу была значительно выше, чем весной 1957 г., а в нижнем бьефе Ивановской ГЭС равнялась 0.70 м/сек.

Таким образом, скорость перемещения водных масс в зоне подпора Угличской ГЭС зависит от величины расходов сброса и продолжительности работы Угличской и Ивановской ГЭС. Поскольку величины сбросов и продолжительность работы ГЭС даже в течение суток изменяются

Г. Ус Ус То Ни Ус Де Р. Р. Ве Се Ни То

7 Н. В. Буторин

де си
лич



2

1958

Пос. Савелово , 1958 18 III 07 30 | - | 0.17 | 0.24 | 0.18 | - | - | - | -

Скорости течения (в м сек.) в Угличском водохранилище

Станция	Дата	Время наблюдений, час. мин.	Горизонт наблюдений, м							
			поверх- ность	2—3	4—5	6 7	8—9	10—12	1 16	20 22
Г. Калязин	1955 14 V	13 00	0.22	—	—	—	—	—	—	—
»	16 V	09 30	0.15	0.11	—	0.14	0.12	0.10	—	—
Устье р. Жабля	16 V	07 50	—	0.06	0.15	0.11	0.10	—	—	—
Устье р. Нерли	14 V	19 00	0.21	—	—	—	—	—	—	—
То же	16 V	14 20	0.08	0.13	—	0.11	0.08	0.07	—	—
Нижний бьеф Ивановской ГЭС . .	15 V	06 00	0.70	—	—	—	—	—	—	—
Устье р. Нерли	6 VIII	18 30	—	0.07	—	—	—	—	—	—
Дер. Дегезы	6 VIII	11 35	—	—	0.09	—	—	—	—	—
Р. Нерль (500 м от устья)	16 V	16 35	0.06	0.06	—	0.09	0.09	0.09	—	—
Р. Большая Медведица	16 V	19 35	0.07	0.06	—	—	0.06	—	—	—
Верхний бьеф Угличской ГЭС . .	1957 11 V	09 32	—	0.20	—	0.11	0.25	0.10	0.2	—
Сел. Красное	11 V	11 20	—	—	0.14	—	0.12	—	0.23	0.07
Нижний бьеф Ивановской ГЭС . .	17 V	13 40	0.23	0.27	0.21	—	0.11	—	—	—
То же	7 VIII	15 05	0.20	—	0.18	—	—	—	—	—
Пос. Савелово	1958 18 III	07 30	—	0.17	0.24	0.18	—	—	—	—

в и р пре е ение с о ростей как по акватории
 о г 5 и я ме я с я
 ре ни ений самописцами ЛПВ 2-р
 14 о и я по всей длине Угличского во-
 в и е я е инии и колеблются в широких
 в я но и на по чевных вертикалях. Так
 фе г ГЖ при ери в 2 км от плотины, скорость
 я вне 2 м от не сроки наблюдений равнялась
 18 Г не 7 ю 127 м/сек (рис 44, а). Несколько
 умень ст р П и и (рис 44 б) но у г Колязина она
 в в и равным п н ом примерно в два раза.
 а чно и менение скоростей по вертикали
 в г Г я ина рис. 44 в) при син роины
 взме бо и е стуч ев ветичение скорости на вертикали
 а ровж ось мен ением ее на вертикали
 л Ве , ти на пер еи ине водны масс в этом районе
 я е о з а е ные морфмь рические особенности
 н о т яют циркуляцию вод В районе Кимр
 ечен н , ь о они ита ь по сравнению с изме
 рени на я н онд наб , ений продолжала уменьшаться,
 о яз но с рож р И яковский ГЖ
 Р я еие о еч ия 1) ни ными интервалами в течение
 ее позво в и ь р дние корости т еения (табл 45).
 чения н и изменения по длине водо ранилица
 да и нашим ными (бу ория 1) и 2) Обращают
 вникает е в ечения ко ей в ечение суток на все горизонта
 яты ей В ря ч мель с се ими часовыми отметками
 1" и даже 0 22 при ем наиболее резкие колебания
 стке водо р н и на примыкающем н плотине. Это
 ние и что и рез ие изменения скорости зависят
 ГЖ , вить е ечасные рас оды Углич
 Ж и м ч ия а те же часы на станции распо ю-
 жен ри 2 м от ее о а метить что и при относительно
 ГЖ ро ьсания скорости сохраняются. Это
 я и н и б 46 При очень небольших колеба
 ях м Углич ГЖ 21 22 июня 1963 г скорость
 жонг 2 и н , и он е 73 нспы ывала значитель-
 еба ии ричем ч о неогроз иим с изменениями расхода
 (а юре менной близости от плотины Углич
 не , нм не является только рез льтатом
 работ Г Г ер роя я , ч , акроп льсания скорости
 У лич и. и а ая я ль ести н воздействием работы
 л И ом й ГЖ
 и I ни о о во р ни ица ю сравненно
 И и я У и учн о Отц ииме инстр ситальные
 ей от и отии о ье того озера пока
 у Г ри м р течения в поверхностном слое
 Ж / чер II о им она лма мсе 0 04 м/сек
 Керман ря) , ее жер постом с юе и 0 11 м/сек
 Р не цм гогатать что приведенные
 н рож ей сния я и лси ансим нно возможн ми так
 ходм цм гитроу днт гали в это время наибольши
 нй рно я по метдм с це тивания водо ранилица
 рти предт и лет цирку лияции вод в Рымбинском водо-
 ропляние по и м водоеме преобладающими являются стоковые
 я особенно зии нй период. (ономте течения возникают здесь

затопленных русел соответствующих рек и являются определяющим звеном в циркуляции водных масс и их переносе. Наиболее мощным из них является волжский поток, представляющий собой воды, сбрасываемые в нижний бьеф Угличского водохранилища. Характер и особенности его обуславливаются прежде всего режимом работы Угличской ГЭС.

Сорос воды из Угличского водохранилища производится обычно через гидростанцию, максимальная пропускная способность которой равна $1200 \text{ м}^3/\text{сек.}$ Поскольку режим работы Угличской ГЭС зависит от покрытия нагрузок энергосистемы (Балагуров, 1957), а энергопотребление имеет резко выраженный суточный ход, то и поступление воды в Рыбинское водохранилище в течение суток весьма неравномерно. Величина среднесуточных расходов колеблется в широких пределах от 200 до $400 \text{ м}^3/\text{сек.}$ В маловодные годы среднесуточные расходы могут уменьшаться до $20-80 \text{ м}^3/\text{сек.}$ (рис. 45, см. вкл. стр. 96-97).

Резкие колебания расходов Угличской ГЭС в течение суток вызывают возникновение в нижнем бьефе волн попусков и обуславливают неустановившийся характер движения воды, что выражается в периодических колебаниях уровня, изменении уклонов водной поверхности и режима течений. Длинные волны в зависимости от направления движения разделяются на прямые, направление перемещения которых совпадает с направлением течения, и обратные, распространяющиеся против течения. По форме волны разделяются на положительные, или волны повышения, и отрицательные, или волны понижения (Егiazаров, 1937; Архангельский, 1947).

Характер распространения волн попусков в нижнем бьефе Угличской ГЭС в ходе суточного и недельного регулирования ее расходов исследован А. С. Литвиновым (1968б). Для примера рассмотрим особенности волнового перемещения водной массы в нижнем бьефе Угличской ГЭС, вызванного отдельным непродолжительным попуском. Вследствие резкого увеличения расхода воды через ГЭС в нижнем бьефе возникает полный волновой цикл, состоящий из следующих волн: прямой положительной, обратной отрицательной, двух прямых отрицательных и двух обратных положительных. В случае отсутствия последующих вынужденных возмущений, обусловленных работой ГЭС, очередной цикл начинается с прямой положительной волны. Затухание волн вызывается, с одной стороны, силами сопротивления и трения, а с другой — частичным отражением их от водной массы центральной части водохранилища, причем второй фактор в этом процессе играет более существенную роль. Данная система волн хорошо прослеживается во время воскресного провала в работе Угличской ГЭС, когда в нижнем бьефе колебания уровней заметны на протяжении трех циклов, а у сел. Коприно — на протяжении первых двух (рис. 46).

Естественно, что при режиме работы Угличской ГЭС отдельными попусками волжский поток не представляет собой постоянного стокового течения, о чем свидетельствует рис. 47. Из этого рисунка видно, что в период исследований Угличская ГЭС производила сбросы 2 раза в сутки — утром и вечером. В соответствии с этим наблюдались два пика уровня, причем если подъем уровня в районе Коприна отмечался почти с началом работы ГЭС, то максимальной отметки уровень достигал обычно через 3 час. 20 мин. Таким образом, с началом работы Угличской ГЭС у Коприна происходило повышение уровня и через некоторое время возникало течение, скорость которого (порядка $0.01-0.015 \text{ м/сек.}$) регистрировалась электробилярной вертушкой Теляева спустя 2 час. 30 мин. после начала работы ГЭС (Буторин и Эдельштейн, 1961). Максимальная скорость течения отмечалась на спаде уровня, а не в момент его максимального подъема.

Исследования показали, что при таком режиме работы Угличской ГЭС течение возникает не одновременно по всему затопленному руслу от нижнего бьефа Угличской ГЭС до расширенной части водохранилища, а с некоторым опозданием, увеличивающимся по мере удаления от ГЭС. Скорость течения по протяженности волжского потока и в отдельных точках его колеблется в широких пределах. С прекращением работы Угличской ГЭС уровень воды в нижнем бьефе понижается, образуются обратные уклоны водной поверхности и воды из центральной части водоема поступают в сторону Угличской ГЭС, вызывая обратные течения (рис. 48). Так, 1 апреля 1962 г. с прекращением работы Угличской ГЭС с 0 до 7 час. уровень воды в районе Коприна резко понизился. Одновременно с пони-

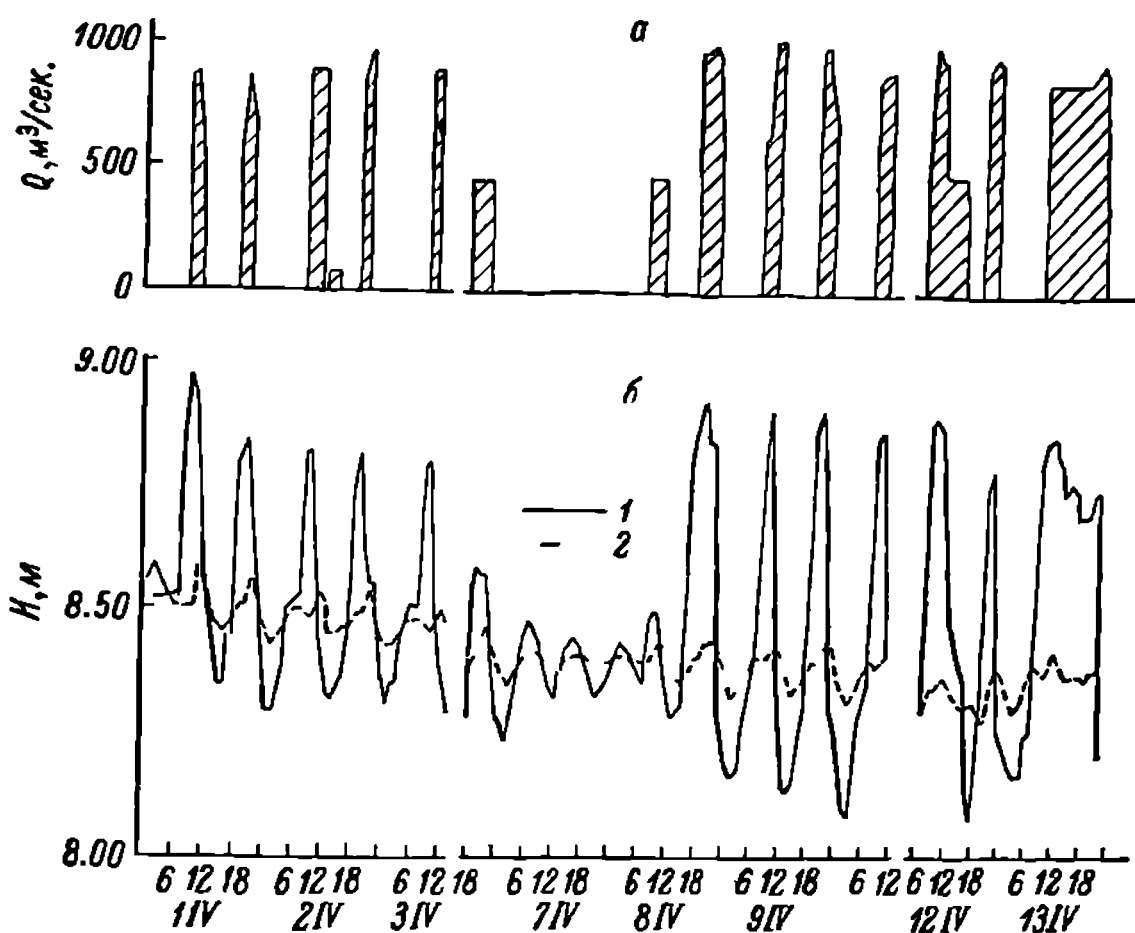


Рис. 46. Сбросы Угличской ГЭС (а) и колебания уровня воды на волжском участке Рыбинского водохранилища (б) в апреле 1964 г. (по А. С. Литвинову, 1968).

1 — у г. Углича; 2 — у сел. Коприно.

жением уровня отмечалось постепенное уменьшение скорости течения, которая через 4 часа после прекращения работы ГЭС стала менее 0.02 м/сек. С уменьшением скорости течения менялось и направление потока. Пока скорость была выше 0.05 м/сек., сохранялось обычное направление потока на север-северо-запад (около 327—332°). При уменьшении ее до менее 0.05 м/сек. течение постепенно отклонялось к западу и при скорости ниже чувствительности вертушки (БПВ-2-р) принимало юг-юго-восточное направление (155—170°), т. е. противоположное обычному (Буторин и Литвинов, 1962). Продолжительность течения на различных участках пути следования волжского потока при таком режиме работы Угличской ГЭС различна.

Сопоставляя данные синхронных наблюдений у пос. Мышкино и сел. Коприно, расположенного в 37 км ниже по течению, можно заметить, что при одном и том же режиме работы Угличской ГЭС нормальное стоковое течение по продолжительности у пос. Мышкино несколько больше, чем у сел. Коприно, а обратное — наоборот. О колебаниях продолжительности течения в отдельной точке волжского потока можно составить представление по наблюдениям у сел. Коприно. В начале зимы при от-

дельных попусках ГЭС продолжительность течения на русловой вертикали у Копряна колебалась от 1 до 4.5 час., а начиная с марта 1963 г. увеличилась до 7—10 и даже до 18 час. в сутки (Буторин и Литвинов, 1963б). При круглосуточной работе Угличской ГЭС волжский поток представляет собой стоковое течение (рис. 49). Скорость течения в потоке волжских вод постепенно уменьшается по мере продвижения их к центру водохранилища. Это хорошо видно из табл. 47, в которой представлены скорости течения на русловых вертикалях волжского потока у пос. Мышкино, расположенного в 33 км от Угличской ГЭС, и у сел. Коприно, находящегося в 70 км от нее. Синхронные наблюдения на этих вертикалях показали, что скорости течения у Мышкина значительно выше, чем у Коприна.

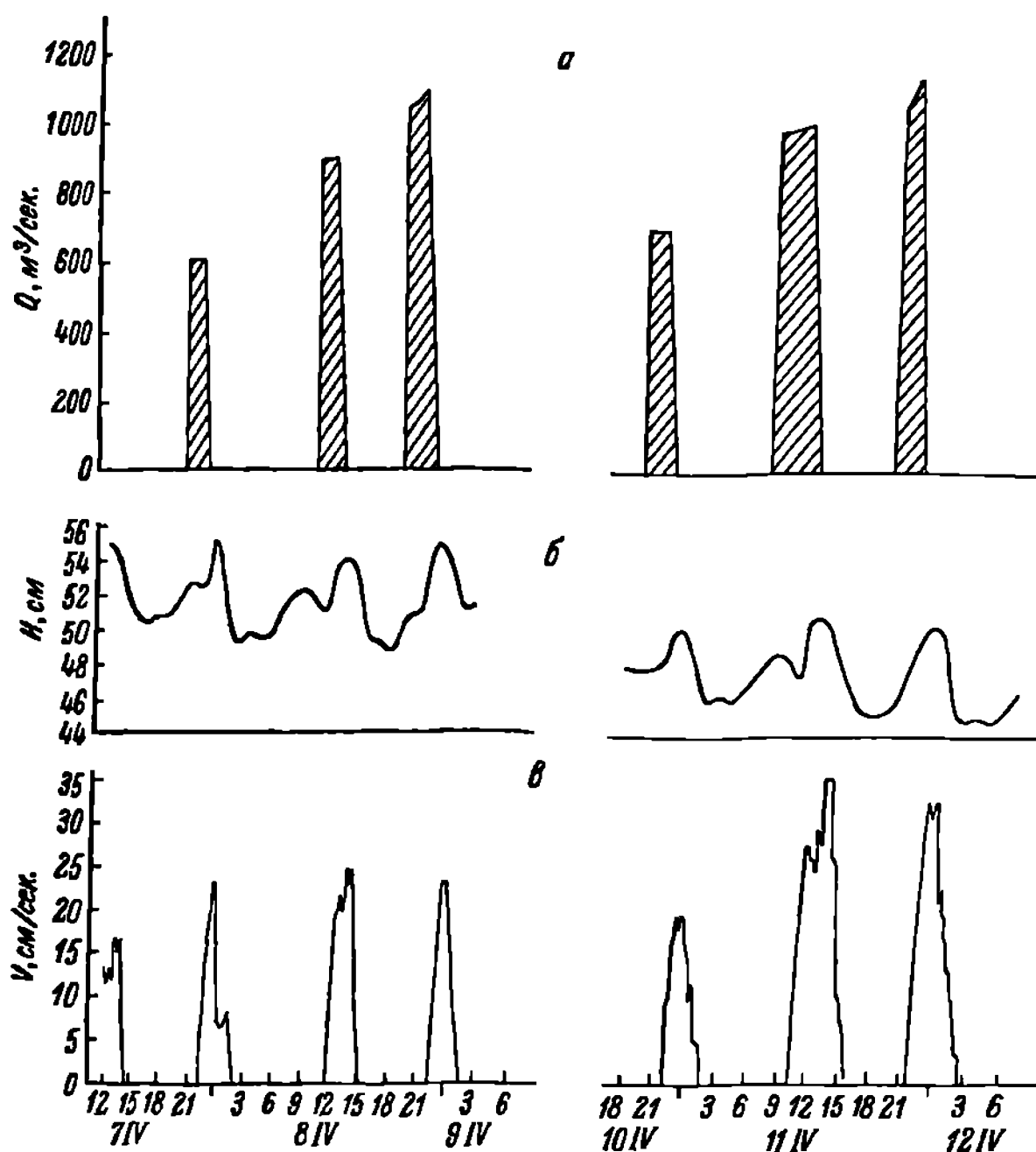


Рис. 47. Сбросы Угличской ГЭС (а), уровень воды (б) и скорость течения (в) в Рыбинском водохранилище у сел. Коприно 7—12 апреля 1960 г.

Несмотря на заметное уменьшение скоростей течения с выходом волжского потока в расширенную часть водохранилища, он отчетливо прослеживается и в районе затопленного г. Мологи. Здесь направление движения волжского потока весьма устойчиво, особенно зимой, и скорость течения в отдельных случаях достигает 0.10—0.13 м/сек. Дальнейшее продвижение волжского потока происходит по затопленному руслу Пушмы, через которое волжские воды поступают в русло Шексны и вместе с шексинскими водами — на приплотинный участок Рыбинской ГЭС, откуда сбрасываются в ее нижний бьеф.

Распределение скоростей течения по поперечному сечению волжского потока на примере разреза у сел. Коприно представлено на рис. 50. Как

видно из этого рисунка, скоростное поле волжского потока формируется в основном на русловом участке разреза. Пойменные участки течением практически не затрагиваются. Эпюры скоростей течения для ряда станций разреза (рис. 51) показывают, что скорость течения, особенно на рус-

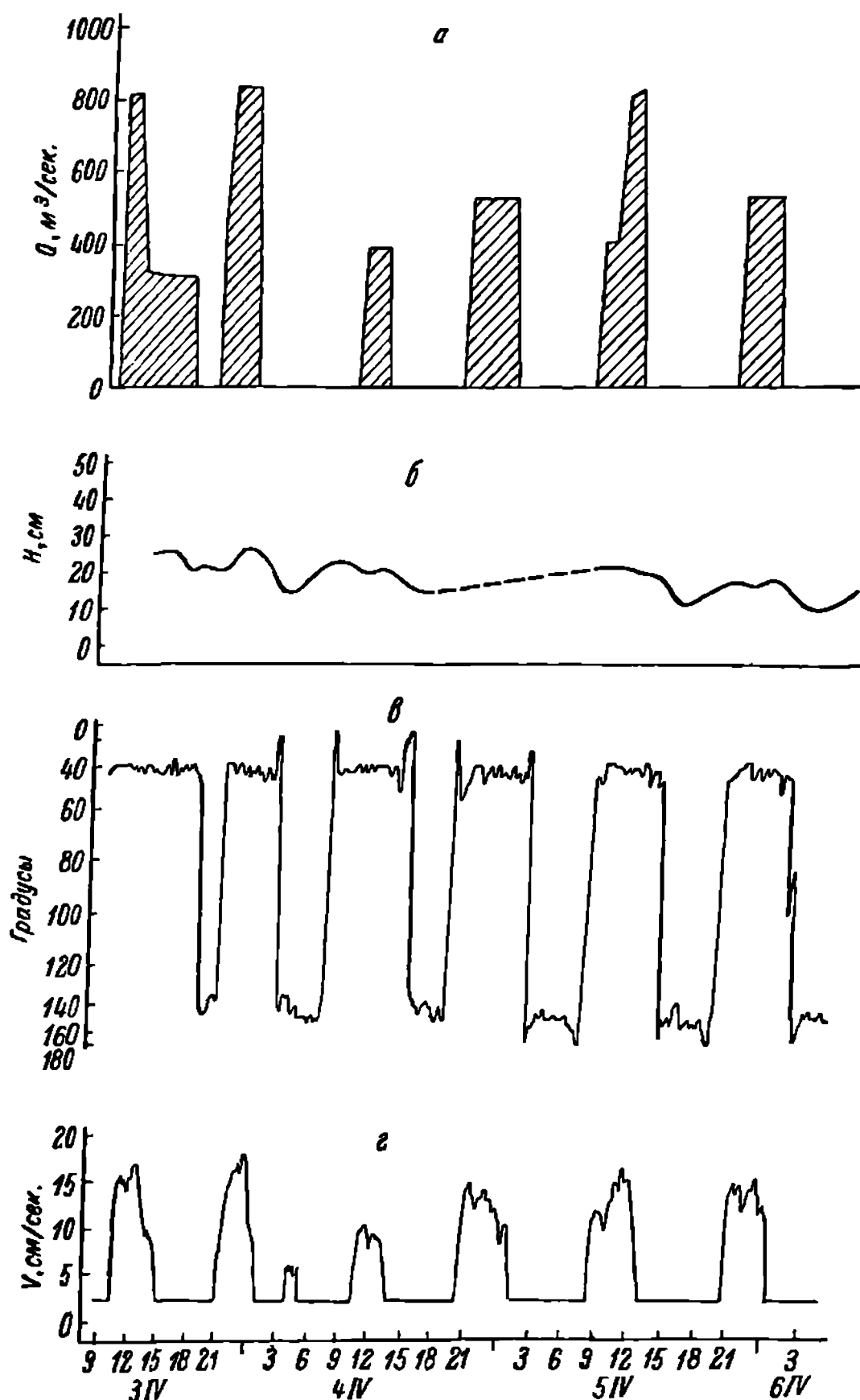


Рис. 48. Сбросы Угличской ГЭС (а), уровень воды (б), направление (в) и скорость течения (г) в Рыбинском водохранилище у сел. Коприно 3—6 апреля 1962 г.

ловых вертикалях, с глубиной меняется очень мало (Буторин и Бакулин, 1963).

Значительно слабее волжского потока выражен в водохранилище поток моложских вод. По мере продвижения моложских вод к открытой части водохранилища скорости течения быстро уменьшаются и уже в районе Первомайских островов и к югу от них слабое течение прослеживается лишь по ватопленному руслу Мологи. В южной части, соприкасаясь с волжскими водами и водами открытой части водоема, моложский поток ста-

новится зависимым от их режима. Это особенно заметно в зимний период, когда даже у Первомайских островов 2 раза в сутки наблюдается заметное

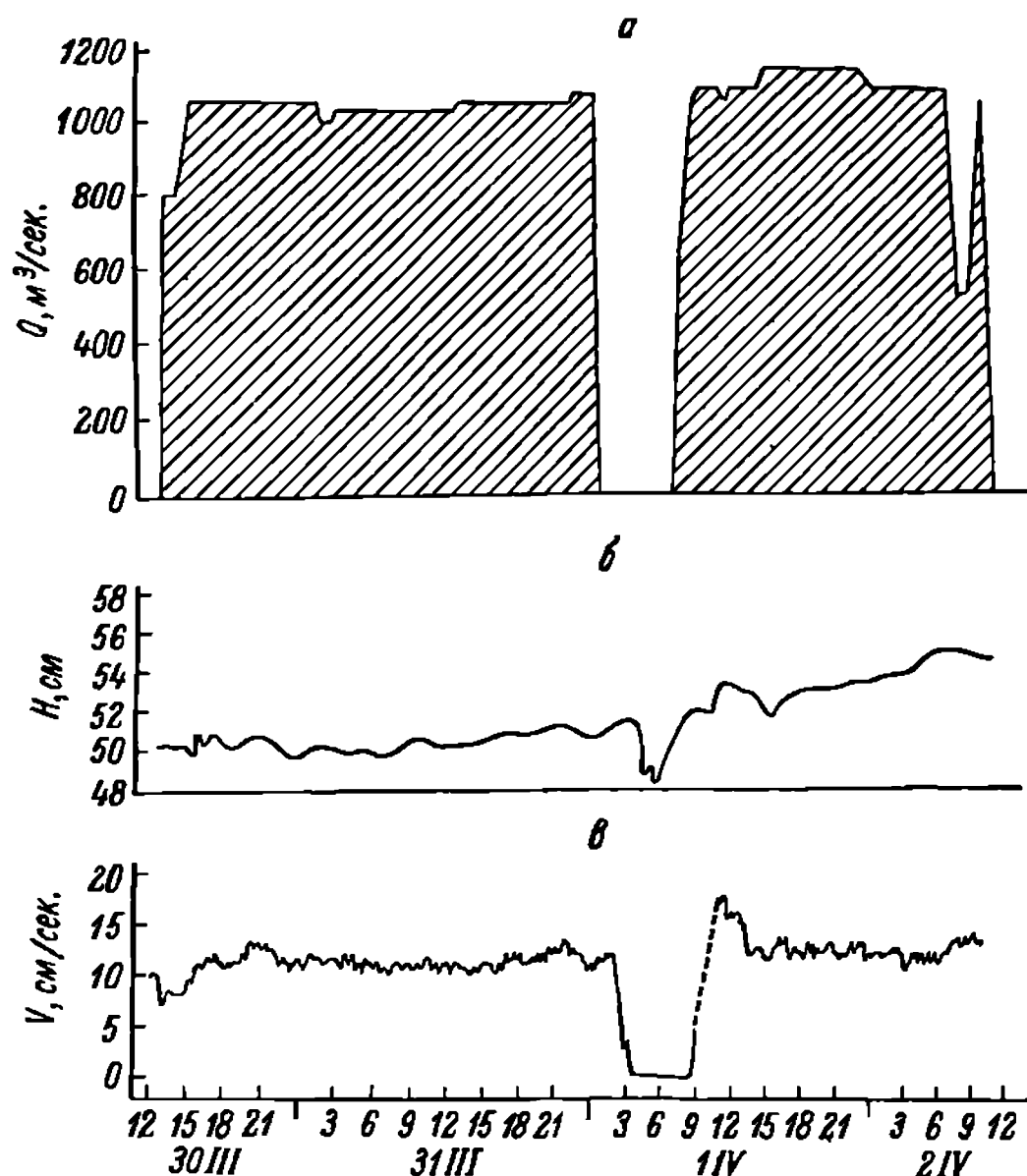
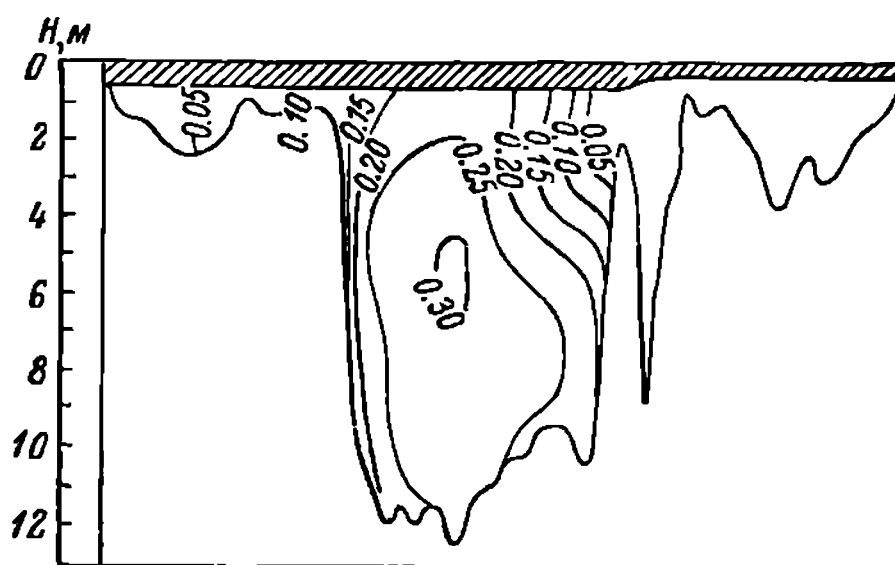


Рис. 49. Сбросы Угличской ГЭС (а), уровень воды (б) и скорость течения (в) в Рыбинском водохранилище у сел. Коприно 30 марта—2 апреля 1961 г.

увеличение скорости течения, которое обуславливается специфическими особенностями режима работы Рыбинской ГЭС.



рале 1962 г., было установлено, что направление потока в этом районе весьма непостоянно. В первый час наблюдений 10 февраля направление потока быстро менялось, но с 11 час. 20 мин. до 18 час. 20 мин. поток имел довольно устойчивое направление на запад-юго-запад (в пределах от 230 до 270). С 18 час. 20 мин. поток отклонился к югу и до 20 час. 50 мин. двигался в пределах 157—230, а затем вновь принял запад-юго-западное направление, которое сохранял до 3 час. 50 мин. 11 февраля. После непродолжительного отклонения поток двигался в этом направлении до 20 час. и снова на короткий промежуток времени откло-

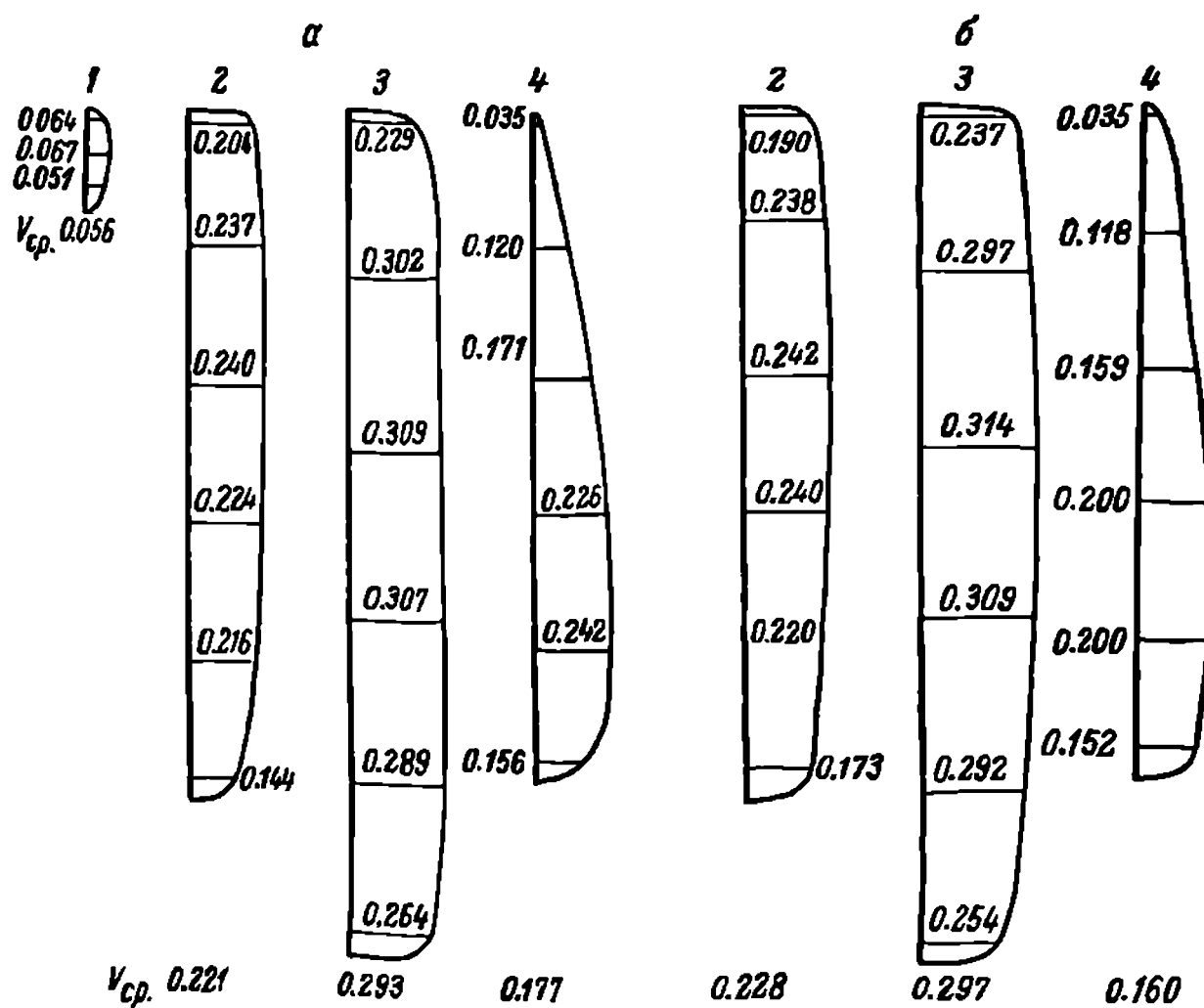


Рис. 51. Эпюры скоростей течения на русловых станциях разреза Борок—Коприно в 12 час. (а) и 13 час. (б) 10 апреля 1962 г.

нился к югу. Возвратясь в исходное положение, поток и при последующих наблюдениях на более или менее продолжительный срок отклонялся в южном направлении, но, как правило, следовал на запад-юго-запад.

Отмеченное непостоянство перемещения вод объясняется взаимодействием моложского и волжского потоков. Волжский поток зимой отчетливо прослеживается у затопленного г. Мологи. Вполне вероятно, что некоторая часть вод волжского потока распространяется к северу от этого района по бывшему руслу Мологи не только до поворота его на северо-запад, но и далее по нему, достигая района Горькая Соль—Леонтьевское. Это происходит, по-видимому потому, что движение волжских вод на север и северо-восток ограничивается мелководьем и наиболее свободно может осуществляться только по руслу Пушмы, а поток моложских вод, объем которых значительно меньше волжских, к этому времени настолько ослабевает, что не в состоянии препятствовать поступлению и движению волжских вод по затопленному руслу Мологи не только до бывшего села Горькая Соль, но и выше. Вероятно, при таком уровне, какой был в феврале 1962 г., в районе Горькой Соли первостепенную роль играл волжский поток. Эти соображения хорошо подтверждаются данными синхронных наблюдений над течениями у Горькой Соли и Коприна, выполненными в феврале 1962 г. (табл. 48).

Т а б л и ц а 48

Скорость и направление течения у сел. Коприно
и бывшего сел. Горькая Соль 12 февраля 1963 г.

Час	Коприно		Горькая Соль	
	скорость, см сек.	направление	скорость, см сек.	направление
0	2.0	139°	3.0	260°
1	2.0	327	3.0	250
2	2.0	324	3.0	250
3	2.0	330	3.0	255
4	2.0	320	3.0	255
5	2.0	360	3.0	244
6	2.0	73	3.0	217
7	2.0	123	3.0	174
8	2.0	91	3.0	175
9	2.0	28	3.0	230
10	2.0	330	3.0	207
11	7.0	322	3.0	195
12	14.0	322	3.0	220
13	13.0	323	3.0	264
14	2.0	320	3.0	260
15	2.0	123	3.0	240
16	2.0	143	3.0	197
17	2.0	145	3.0	155
18	3.0	145	3.0	195
19	2.0	310	3.0	157
20	17.0	320	3.0	160
21	20.0	320	3.0	254
22	18.0	323	3.0	264
23	12.0	324	3.0	265
24	2.0	320	3.0	265

Эти данные показывают, что при обычном движении волжского потока перемещение вод по затопленному руслу Мологи у Горькой Соли действительно происходит на запад-юго-запад, что определяется в основном положением русла Мологи. При ослаблении волжского потока, а затем при смене направления течения в нем на обратное, из юго-западной части водохранилища происходит отток вод в волжский плес, который вместе с моложским потоком и отклоняет к югу течение у Горькой Соли. Таким образом, скоростной режим моложского потока зависит не только от величины стока Мологи, но и от режима волжского потока, активное взаимодействие с которым происходит у него в районе Горькой Соли.

До сооружения Череповецкого гидроузла наиболее слабо выражен был поток шекснинских вод. Скорости его течения выше 0.03 м/сек. даже в зимний период отмечались лишь севернее сел. Гаютино. При общей направленности движения водной массы водохранилища в сторону Рыбинской ГЭС слабый поток шекснинских вод по затопленному руслу Шексны весьма неустойчив и часто под воздействием перемещения окружающей водной массы отклоняется от направления, определяемого положением русла Шексны. Практически он теряется в водах центральной части водохранилища.

Центральная часть водохранилища ввиду удаленности от речных потоков Волги, Мологи и Шексны, а также от ГЭС характеризуется слабой проточностью. Однако наши наблюдения показали, что и в ней даже зимой прослеживается постоянное перемещение водных масс. Оно не представляет собой обычного стокового течения и обусловлено главным образом движениями основных потоков речных вод и режимом работы гидросооружений. Перемещение водных масс в этой части водоема происходит

не только по затопленным руслам рек, но и по пойменным участкам и междуречьям. Если учесть значительную сработку водохранилища и связанный с ней процесс скатывания вод с мелководий и пойменных участков в затопленные русла, то можно считать, что постоянных застойных зон даже в центральной части водохранилища не существует. С подтоком водных масс к Рыбинской ГЭС поток их начинает постепенно приобретать черты стокового течения, режим которого определяется характером работы Рыбинской ГЭС.

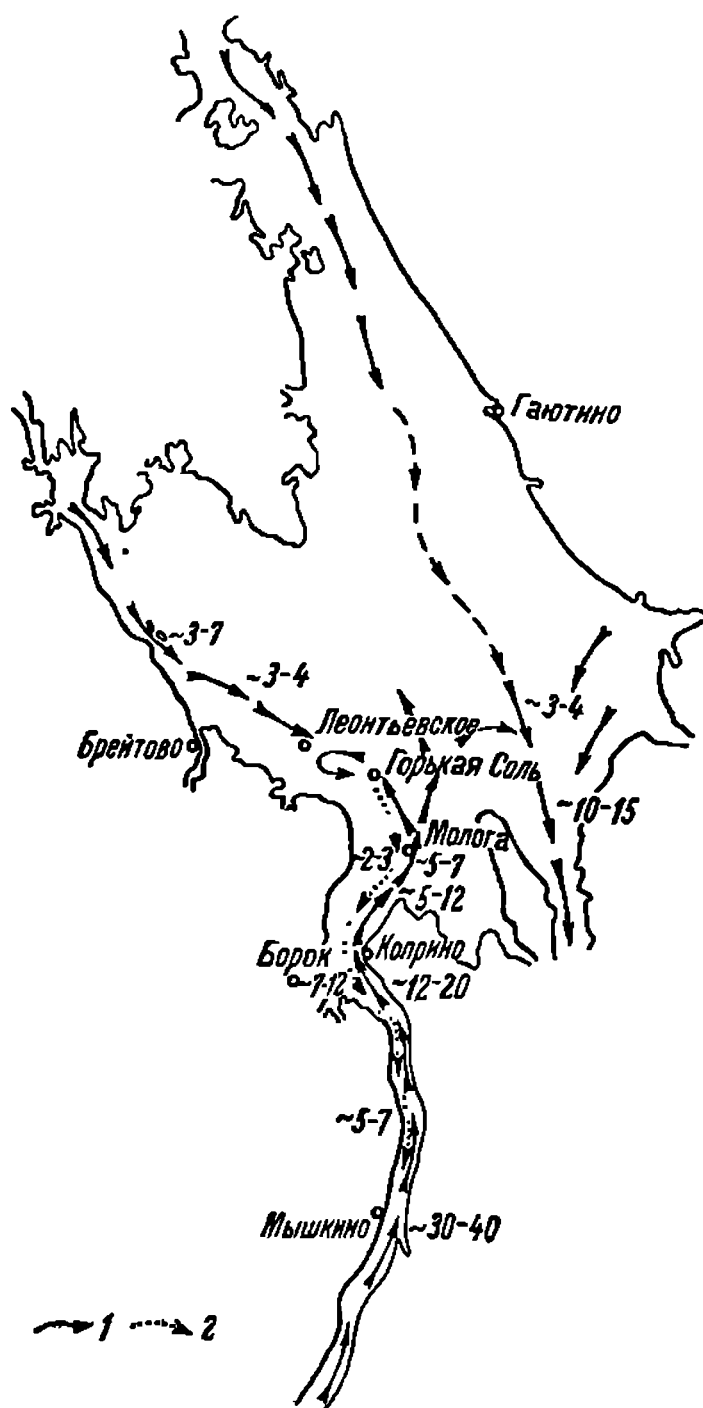


Рис. 52. Схема течений в Рыбинском водохранилище в зимний период.

1 — течение в сторону Рыбинской ГЭС; 2 — течение в обратном направлении. Цифрами обозначены скорости течения (в см/сек.).

Общая схема движения отдельных потоков в водохранилище для зимнего периода показана на рис. 52. Она дает представление о хорошо- и слабопроточных районах водохранилища. Из этой схемы видно, что определяющую роль в зимней циркуляции водных масс водохранилища играют три основных речных потока — волжский, моложский и шекснинский. Наиболее существенное значение имеет волжский поток. Поступая в расширенную часть водохранилища, он разветвляется на две части. Основная ветвь движется по руслу Пушмы и, попадая в русло Шексны в районе бывшего сел. Всехсвятского, поворачивает на юго-восток, в сторону ГЭС. Эта ветвь волжского потока вместе с водами рек Ухры и Согожи, с одной стороны, представляет основную массу воды, поступающей к ГЭС и сбрасываемой в нижний бьеф, а с другой стороны, она задерживает перемещение в этом направлении водных масс из центральной части водохранилища. Другая ветвь волжского потока севернее затопленного г. Мологи направляется по руслу Мологи в район Горькой Соли и, перемешиваясь с моложской водой, вовлекается в основную

ветвь потока по руслу Пушмы. Роль моложского и шекснинского потоков в циркуляции вод водохранилища значительно ниже, чем волжского. Первый из них отчетливо прослеживается лишь до района пос. Брейтово и несколько южнее его, а второй с выходом в расширенную часть водохранилища практически теряется в водах центральной части.

Схема зимней циркуляции водных масс водохранилища при отсутствии ледяного покрова в значительной степени усложняется наложением ветровых и связанных с ними компенсационных течений. Если основные речные потоки и при открытой водной поверхности в общих чертах сохраняют свои особенности, то в центральной части водохранилища преобладающими являются ветровые течения.

С притоком талых вод резко увеличиваются сбросы воды из Угличского водохранилища. Угличская ГЭС переходит на вынужденный базисный режим работы. В результате увеличения расходов в нижнем бьефе Угличской ГЭС резко возрастают уклоны водной поверхности и скорости течения. Во время пропуска половодья при среднесуточных расходах Угличской ГЭС порядка $7000 \text{ м}^3/\text{сек.}$ и более максимальные скорости течения на волжском участке могут достигать 1 м/сек. Так, весной 1955 г. даже на спаде половодья 12 мая скорость течения у сел. Гле-

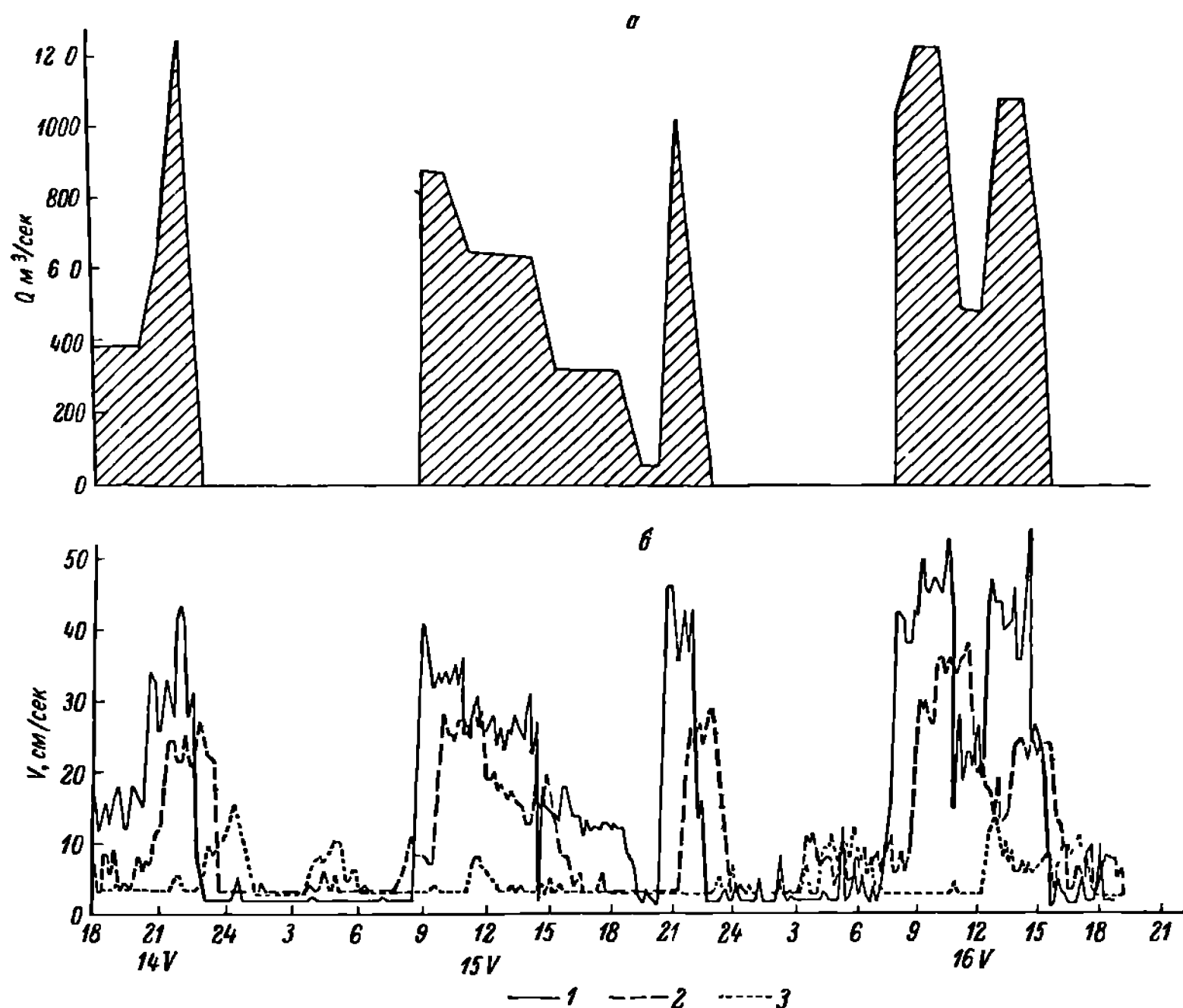


Рис. 53. Сбросы Угличской ГЭС (а) и скорость течения (б) на волжском участке Рыбинского водохранилища в мае (1963 г.) у г. Углича (1), пос. Мышкино (2), сел. Коприно (3).

бово в поверхностном слое была порядка 0.70 м/сек. , а 17 мая у сел. Коприно — 0.55 м/сек.

В зависимости от режима работы Угличской ГЭС, объема половодья и положения уровня водохранилища скорости течения в нижнем бьефе могут из года в год существенно изменяться. Так, в мае 1963 г. максимальные скорости течения в районе Угличской ГЭС не превышали 0.54 м/сек. , а у сел. Коприно были порядка $0.10\text{—}0.15 \text{ м/сек.}$ (рис. 53). По ходу волжских вод к центральной части водоема скорости течения заметно уменьшаются и в районе Шуморовского острова весной не превышают $0.10\text{—}0.12 \text{ м/сек.}$

С окончанием весеннего половодья и уменьшением среднесуточных расходов Угличской ГЭС до $30\text{—}40 \text{ м}^3/\text{сек.}$ постоянного стокового течения в нижнем бьефе не наблюдается. При относительно постоянном уровне водохранилища в летний период скорость течения в районе

пос. Мышкино равна примерно 0.03—0.10 м/сек., а у сел. Коприно она ниже чувствительности используемых приборов.

С началом сработки Рыбинского водохранилища и некоторым увеличением расходов Угличской ГЭС в осенний период скорости течения на волжском участке водохранилища снова увеличиваются. Например, в октябре 1963 г. максимальные скорости течения здесь изменялись от 0.55—0.60 м/сек. в нижнем бьефе Угличской ГЭС до 0.10 м/сек. у сел. Коприно. При отсутствии ледяного покрова в нижнем бьефе Угличской ГЭС в основном сохраняются те же особенности режима стоковых течений, что и в зимний период. Периодические сбросы воды через Угличскую ГЭС, как и зимой, приводят к образованию длинных волн, в результате отражения некоторых от водной массы центральной части водохранилища возникают обратные течения. Продолжительность их в это время обычно составляет 2—3 часа, а максимальные скорости могут достигать 0.10—0.12 м/сек.

С уменьшением объемов попусков и при более высоком уровне водохранилища в весенне-летний период наблюдается более интенсивное распластывание волн попусков, вследствие чего выклинивание волжского потока происходит значительно выше, чем зимой.

Аналогичные сезонные изменения скоростного режима прослеживаются и на моложском и шекснинском участках водохранилища. В период половодья проточность их значительно увеличивается. Некоторое представление о скоростях течения в зонах выклинивания подпора моложского и шекснинского потоков для характерных лет можно получить из табл. 49. С приближением к открытой части водохранилища скорости течения в этих потоках уменьшаются, но даже в районе Первомайских островов по Мологе и у сел. Городища по Шексне и период пика половодья они могут достигать 0.50—0.70 м/сек.

Распределение скоростей течения по длине рассматриваемых участков водохранилища в значительной степени определяется объемом половодья и положением уровня водоема. Эта закономерность установлена К. К. Эдельштейном (1961) на примере моложского потока. Исследования этого автора показали, что в 1959 г., когда уровень водохранилища в конце первой половины мая был несколько выше отметки НПУ, наблюдалась следующая картина в распределении скоростей течения по длине моложского участка водохранилища. Выше весьегонского расширения у сел. Харламовского прослеживался хорошо выраженный речной поток с типичным для реки распределением скоростей течения по его сечению. Максимальная скорость отмечалась на русловой вертикали и равнялась 0.21 м/сек., а средняя скорость составляла 0.16 м/сек. В весьегонском расширении скорости течения резко уменьшаются и на русловых вертикалях их средние величины не превышали 0.04—0.06 м/сек. С выходом потока из расширения средняя скорость течения в русле вновь увеличивалась до 0.16 м/сек. Максимальная скорость на затопленной левобережной пойме равнялась 0.15 м/сек. С уменьшением площади живого сечения потока при движении его к водохранилищу происходило дальнейшее увеличение скоростей течения. Так, в створе устья р. Малиновки средняя скорость на русловой вертикали достигала 0.18 м/сек., а наибольшая — 0.29 м/сек. В этом районе отмечались и наиболее значительные скорости на затопленной пойме, где они колебались в пределах 0.16—0.20 м/сек. С выходом моложского потока в расширенную часть водохранилища скорости течения снова уменьшались и ниже устья р. Ламы не превышали 0.10 м/сек.

При низком уровне водохранилища в мае 1960 г. стоковое течение прослеживалось значительно южнее, чем весной 1959 г. В маловодный год даже у Первомайских островов скорость течения в бывшем русле Мо-

Т а б л и ц а 49

Скорость течения и расходы Мологи и Шексны
в весенне-летний период

Дата	Молога, г. Устюжна			Дата	Шексна, дер. Черная Гряда		
	скорость течения, м сск.		расход, м сек.		скорость течения, м сек		расход, м сек.
	средняя	макси-мальная			средняя	макси-мальная	
1 9 6 1				1 9 6 1			
19 IV	0.87	1.18	806	18 IV	0.12	0.15	42.2
23 IV	0.92	1.28	984	21 IV	0.41	0.53	203
30 IV	0.82	1.17	781	28 IV	0.59	0.76	440
11 V	0.65	0.90	360	8 V	0.75	1.01	753
3 VI	0.56	0.80	246	3 VI	0.57	0.78	482
16 VII	0.35	0.68	86.1	10 VII	0.36	0.52	263
1 9 6 2				1 9 6 2			
12 IV	0.91	1.18	926	8 IV	0.54	0.73	285
19 IV	1.07	1.42	1450	19 IV	0.84	1.12	894
23 IV	1.03	1.29	1220	24 IV	0.72	0.94	605
30 IV	0.78	1.07	836	30 IV	0.64	0.86	543
10 V	0.70	0.90	417	11 V	0.64	0.88	528
10 VI	0.51	0.80	164	6 VI	0.54	0.73	433
10 VII	0.39	0.74	101	9 VII	0.31	0.44	235
1 9 6 3				1 9 6 3			
13 IV	0.26	0.33	32.1	14 IV	0.25	0.47	14.9
23 IV	0.83	1.07	727	23 IV	0.49	0.73	641
30 IV	0.77	1.05	576	30 IV	0.46	0.64	510
5 V	0.67	0.89	407	5 V	0.51	0.73	483
12 VI	0.39	0.70	88.2	12 VI	0.04	0.07	111
14 VII	0.35	0.72	67.7				

логи достигала 0.24 м/сек., а в районе ватопленного сел. Борисоглеба до 0.10 м/сек. Летом скорости течения в моложском потоке уменьшаются (табл. 50), а с началом сработки водохранилища в осенний период и при значительных дождевых паводках вновь увеличиваются. Так, осенью в районе устья р. Малиновки отмечались скорости течения порядка 0.25—0.30 м/сек., а у Первомайских островов до 0.15 м/сек.

Осенью, как и зимой, на режим течений оказывают влияние сбросы воды через Рыбинскую ГЭС (табл. 51). На примере суточной станции,

Т а б л и ц а 50

Пределы скоростей течения на моложском и шекснинском участках
Рыбинского водохранилища по русловым вертикалям в летний период

Моложский плес		Шекснинский плес	
положение станции	скорость течения, м/сек.	положение станции	скорость, течения, м/сек.
4 км выше сел. Харламовского	0.24—0.35	10 км выше г. Череповца	0.10—0.17
Сел. Харламовское	0.17—0.25	Г. Череповец	0.08—0.15
Г. Вельегонск	0.05—0.15	Устье р. Суды	0.07—0.12
Устье р. Малиновки	0.05—0.18	Сел. Городище	0.05—0.09
Борок-заповедник	0.03—0.12	Сел. Вичелово	0.03—0.06
Первомайские острова	0.03—0.10	Сел. Ольхово	0.03—0.08
		Сел. Мякса	0.03—0.07

взятой на траверзе устья р. Малиновки в октябре 1966 г., можно видеть, что скорость течения изменялась в широких пределах, а ее максимальные значения совпадали с соответствующими величинами расходов Рыбинской ГЭС.

Т а б л и ц а 51

Скорости течения (в м/сек.) на траверзе устья р. Малиновки
29 30 октября 1966 г.
(по А. С. Литвинову, 1966)

Среднее наблюдение время	Сброс Рыбинской ГЭС, м/сек	Горизонт наблюдений, м					
		поверхность	2	5	7	10	11
12	1550	0.08	0.10	0.11	0.10	0.14	0.10
14	1560	0.13	0.18	0.14	0.14	0.15	0.11
16	1600	0.31	0.27	0.23	0.19	0.19	0.18
18	2530	0.28	0.29	0.24	0.22	0.22	0.18
21	0	0.15	0.13	0.13	0.15	0.14	0.10
00	0	0.22	0.22	0.20	0.18	0.18	0.11
03	0	0.19	0.19	0.18	0.17	0.12	0.11
06	0	0.18	0.17	0.15	0.15	0.13	0.07
09	0	0.10	0.10	0.07	0.05	0.04	—

Отмеченные особенности в изменении скоростей течения в моложском потоке характерны и для шекснинского участка водохранилища. По данным А. Н. Кренке (1958), скорости течения на его русловых вертикалях в мае 1955 г. изменялись от 0.26 м/сек. у г. Череповца до 0.12 м/сек. в районе затопленного сел. Роя. Как и на других речных участках Рыбинского водохранилища, минимальные скорости течения наблюдаются здесь в летний период. Некоторое представление об изменении их в этом сезоне можно получить из табл. 50.

Таким образом, скорости течения в речных потоках Волги, Мологи и Шексны постепенно уменьшаются и на выходе их в открытую часть водохранилища становятся обычно ниже чувствительности используемых приборов. Только в период весеннего половодья скорость стокового течения в этом районе достигает иногда 0.10—0.15 м/сек. В открытой части водохранилища слабые стоковые течения на протяжении всего безледного периода перекрываются ветровыми.

Даже при слабых и неустойчивых ветрах здесь отмечается большая подвижность поверхностных вод. Часто в движение приходит вся водная масса эпилимниона, причем она четко делится в нем обычно на два слоя, вода в которых течет иногда с разными скоростями и в различных направлениях (Эдельштейн, 1963б). Ветровые течения в летне-осенний период преобладают на всей площади открытой части водохранилища и на граничных с ней участках. Скорость и направление ветрового перемещения водных масс зависят от скорости и направления ветра и являются весьма изменчивыми характеристиками. Некоторое представление о распределении скоростей и направления ветрового течения в открытой части водохранилища можно получить из табл. 52, составленной по данным А. С. Литвинова (1965).

Исследования А. С. Литвинова (1965) показали, что при устойчивых и продолжительных ветрах возникает ветровое течение, в результате которого поверхностные слои воды в водохранилище могут перемещаться на большие расстояния. Так, в конце августа—начале сентября 1965 г. при южном и юго-восточном ветре от 4—6 до 8—10 м/сек. свободно плавающие поплавки за 4—5 суток переместились в ряде случаев на 40—50 км (рис. 54). Средняя скорость их движения составляла 0.09—0.13 м/сек.

Скорость и направление ветровых течений на отдельных участках открытой части Рыбинского водохранилища летом 1963 г.

Дата и время наблюдений, час. мин.	Ветер		Горизонт м					
	ско- рость, м сек.	направ- ление, град.	поверхность		2 3		5 6	
			скорость, м сек.	направле- ние, град.	скорость, м/сек.	направле- ние, град.	скорость, м/сек.	направле- ние, град.

Б а б и н с к и е о с т р о в а

31 V

11 07	10.0	40	0.053	174	0.039	171	—	—
18 10	6.9	20	0.051	176	0.011	171	—	—
20 07	7.2	30	0.052	192	0.024	172	—	—

16 VIII

Н а в о л о к

15 07	4.2	240	0.059	120	0.025	116	—	—
17 10	4.9	285	0.042	116	0.013	100	—	—
19 32	5.5	260	0.050	127	0.022	91	—	—
21 05	3.2	270	0.015	88	0.008	130	—	—

22 VIII

11 12	4.5	165	0.018	358	0.023	163	0.050	192
12 40	3.0	155	0.022	25	0.035	166	0.052	205
14 10	2.5	130	0.010	112	0.052	187	0.045	218
15 40	1.8	120	0.021	139	0.058	190	0.039	203
17 10	1.6	95	0.010	248	0.044	194	0.033	229
18 40	1.8	75	—	—	0.047	201	0.015	196

23 VIII

07 30	7.0	130	0.023	269	0.021	205	0.028	208
08 40	5.8	125	0.026	284	0.016	211	0.038	199
10 10	5.6	110	0.026	262	0.036	192	0.058	197

При этом данные наблюдений показывают, что в направлении ветра перемещается лишь верхний 2—3-метровый слой воды. Ниже этого слоя течение обычно направлено или под большим углом и направлению ветра или в противоположную сторону (рис. 55).

Мелководность Рыбинского водохранилища, сложный рельеф дна и непостоянство ветрового режима обуславливают сложную систему ветровых течений. Для примера рассмотрим характер перемещения водных масс под воздействием ветра на затопленной пойме Мологи 27 октября 1964 г. При западном и северо-западном ветре с 9 до 13 час. в районе наблюдений течение по всей вертикали имело северное направление (рис. 56, кривые 1, 2). В 14 час. до горизонта 3.5 м течение имело уже южное направление и только в придонном 2-метровом слое оно сохраняло северное направление. В последующие часы скорость течения в поверхностном слое увеличилась, но толщина слоя, в котором прослеживалось южное течение, уменьшилась (рис. 56, кривые 3, 4, 5). С 19 час. течение снова по всей вертикали было направлено на север-северо-запад (рис. 56, кривые 6, 7).

С изменением направления ветра меняется направление течения, но не одновременно, а с некоторым опозданием. Наблюдениями А. С. Литвинова установлено, что при скорости течения 0.04—0.05 м сек. в поверхностном слое толщиной 80 см при резком изменении ветра на 130° и увеличении скорости ветра до 6—8 м/сек. промежуток времени, необходимый

для установления нового направления течения, составляет 90 мин. Аналогичные результаты получены Хайнесом и Брисоном (Haines and Bryson, 1961) на оз. Мендота.

Все эти данные свидетельствуют о том, что режим ветровых течений Рыбинского водохранилища чрезвычайно сложен. Перемещение водных масс под воздействием ветра в водоеме весьма изменчиво и определяется одновременным воздействием целого ряда факторов: ветрового режима, стоковых течений, глубины, рельефа дна и очертания берегов. На ветро-

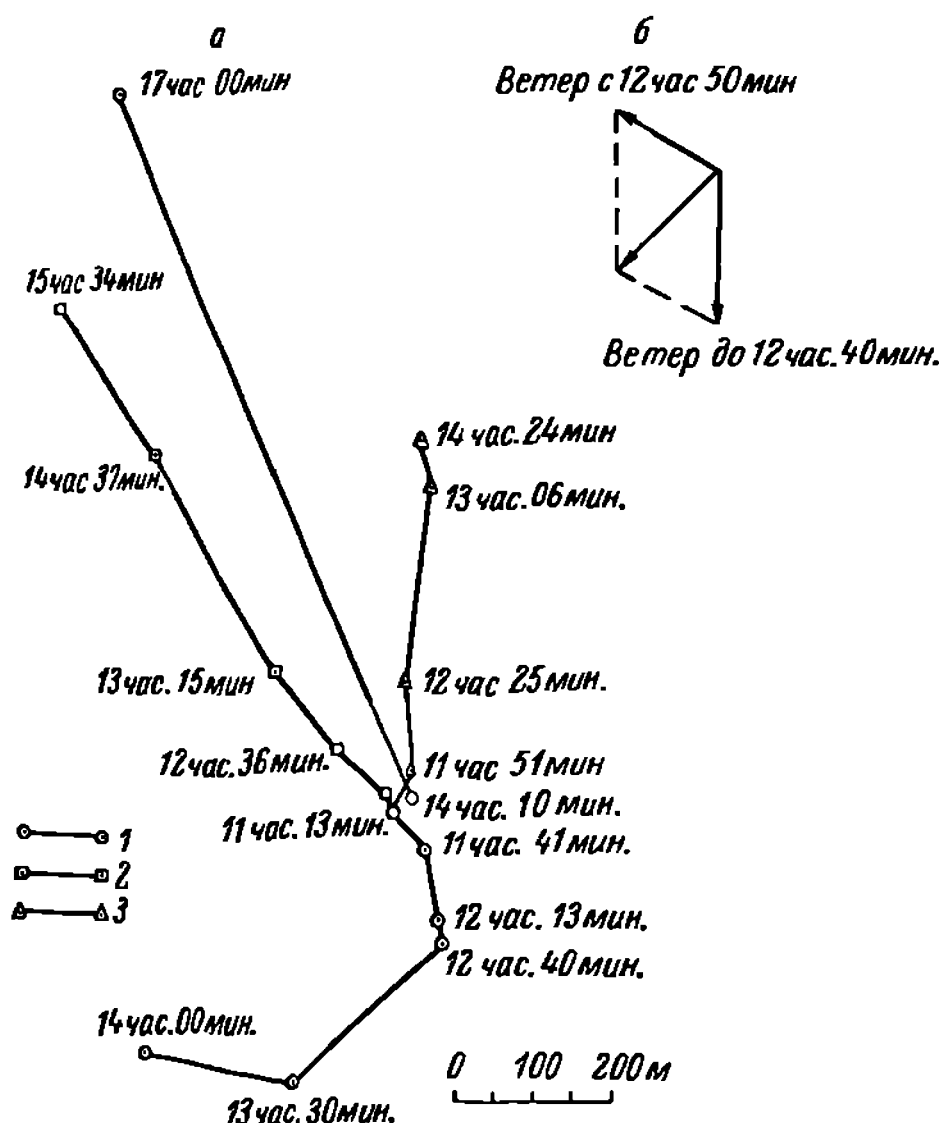


Рис. 54. Траектории перемещения свободноплавающих поплавков (а) и направление ветра (б) на шекснинском участке Рыбинского водохранилища 26 августа—3 сентября 1965 г.

1 — в слое 0—0.8 м; 2 — в слое 2—2.8 м; 3 — в слое 6—6.8 м.

вые течения оказывает влияние ветер предшествующего периода а также колебания водных масс стонно-нагонного происхождения.

Теоретические исследования В. Б. Штокмана (1953) хорошо объясняют особенности ветровых течений в Рыбинском водохранилище. Изучая горизонтальную циркуляцию вод в мелком море или водохранилище, вызванную ветром, В. Б. Штокман установил, что на нее, кроме поперечной неравномерности ветра, существенное влияние оказывает рельеф дна. В частности, возможность возникновения противотечений в поперечном сечении мелкого водоема переменной глубины зависит не только от поперечной неравномерности касательного трения ветра, но и от глубины причем возможность противотечения увеличивается с возрастанием последней. «При всех прочих равных условиях противотечение вероятнее ожидать в желобообразных углублениях дна мелкого моря или водохранилища, нежели в мелководных их частях» (Штокман, 1953, стр. 19). Аналогичная картина наблюдается и при равномерном ветре. В водоеме переменной глубины при равномерном ветре противотечение также приурочено к впадинам-желобам, а в наиболее мелких частях поперечного

сечения его вода от поверхности до дна движется по ветру. Такие явления неоднократно наблюдались нами на Рыбинском водохранилище (Буторин, 1966, в).

В отличие от открытой части водохранилища на приплотинном участке Рыбинской ГЭС, как и в зимний период, решающую роль в динамике водных масс играют стоковые течения. Максимальные скорости течения, как правило, наблюдаются по затопленному руслу Шексны в районе ГЭС и на траверзе дер. Волково. По мере удаления от ГЭС к центральной части водохранилища скорости течения уменьшаются и в 16 км от нее даже в русле Шексны редко превышают 0.15 м/сек., а на пойменных участках колеблются около 0.10 м/сек. (Буторин и Литвинов, 1963б).

Вертикальное распределение скоростей течения на приплотинном участке аналогично речному: максимальные скорости наблюдаются на поверхности и постепенно уменьшаются ко дну (табл. 53). В отдельные периоды в районе ГЭС отмечается некоторое увеличение скорости течения на горизонтах 0.4—0.6 Н, в слое забора воды к турбинам ГЭС.

Режим стоковых течений на приплотинном участке определяется характером сработки воды из водохранилища, а абсолютные значения скорости зависят от величины расхода воды через Рыбинскую ГЭС и по-

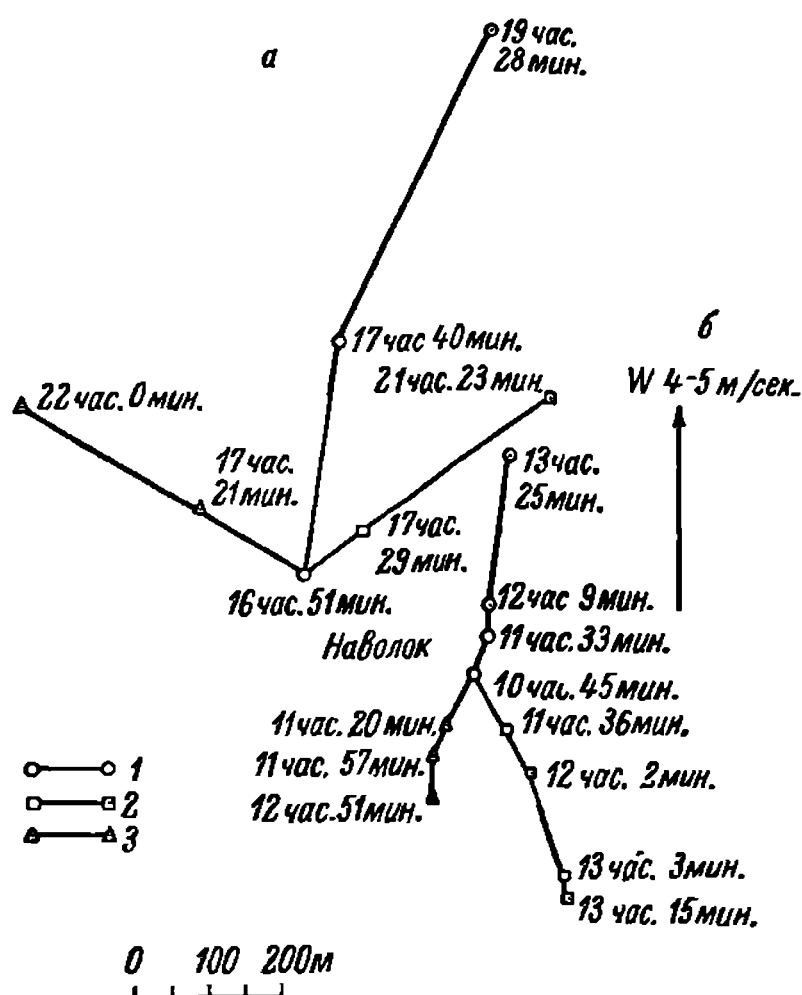


Рис. 55. Траектории перемещения свободно-плавающих поплавков (а) и направление ветра (б) в центральной части Рыбинского водохранилища (район бывшего сел. Наволок) 23—24 июня 1965 г.

1 — в слое 0—0.8 м; 2 — в слое 2.0—2.8 м; 3 — в слое 7.0—7.8 м.

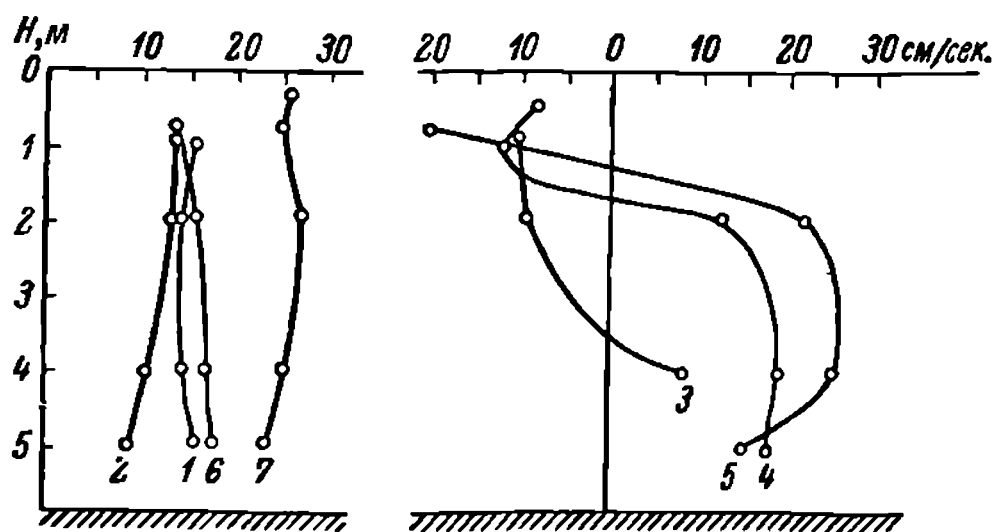


Рис. 56. Эпюры скоростей течения на волжском участке Рыбинского водохранилища 24 октября 1964 г.

1 — 10 час.; 2 — 12 час.; 3 — 14 час.; 4 — 16 час.; 5 — 18 час.; 6 — 19 час.; 7 — 20 час.

ложения уровня в верхнем бьефе (рис. 57). Так, при расходах ГЭС порядка 3000 м³/сек. максимальные скорости течения у дер. Волково

Распределение скоростей течения (в м/сек.) на разрезе в 9 км от Рыбинской ГЭС
10 октября 1962 г.
(по А. С. Литвинову, 1965)

Номер станции	Глубина станции, м	Горизонт, м							
		0.5	2.0	5.0	7.0	10.0	15.0	20.0	дно
1	2.6	0.13	0.10			—			—
2	9.2	0.18	0.12	0.10	0.09		—		0.06
3	24.4	0.17	0.13	0.09	0.08	0.06	0.06	0.05	0.03
4	8.4	0.13	0.08	0.06	ст		—		ст
5	2.8	0.07	0.04		—		—		—

могут достигать 0.35 м/сек., а при расходах 400—500 м³/сек. — лишь 0.05—0.07 м/сек. При резком уменьшении расходов Рыбинской ГЭС и образовании обратной положительной волны (Литвинов, 1968б) на приплотинном участке могут возникать течения, направленные от плотины. В этом случае скорость течения в районе дер. Волково обычно не превышает 0.10 м/сек., а продолжительность его составляет 1—2 часа.

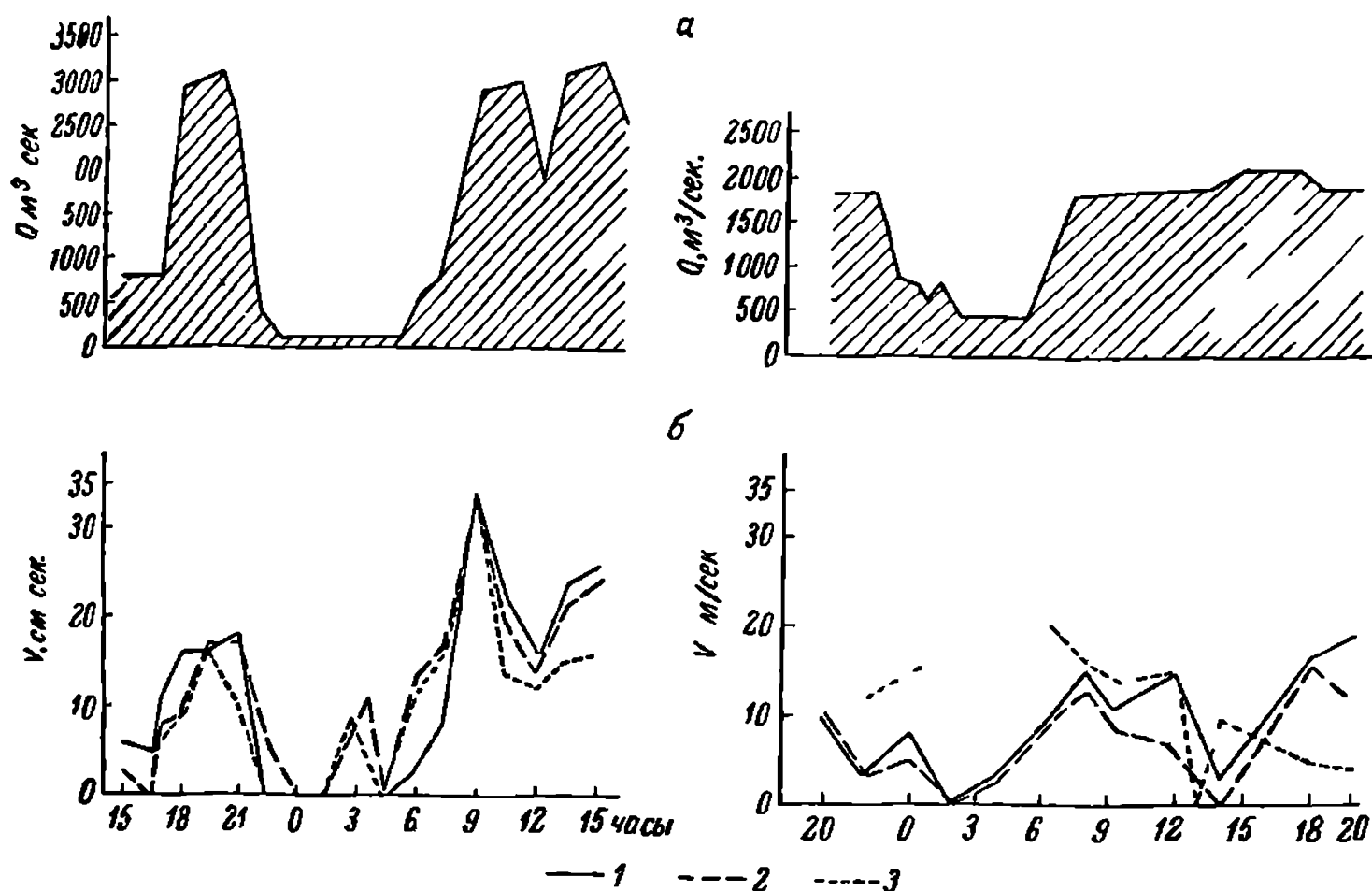


Рис. 57. Сбросы Рыбинской ГЭС (а) и скорости течения (б) на приплотинном участке Рыбинской ГЭС.

1 — 2-метровый горизонт; 2 — 5-метровый горизонт; 3 — 15-метровый горизонт.

Зависимость скорости течения вблизи гидростанции от режима ее работы хорошо прослежена нами в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС. Для этого были использованы материалы контрольных измерений расходов через турбины ГЭС, выполненных в 1956 г. Рыбинской гидрометеорологической обсерваторией и Институтом биологии внутренних вод АН СССР совместно с Гидротехнической службой Мосэнерго и сотрудниками ГЭС. Синхронность и массовость измерений скоростей течения по вертикалям с четырех-пятикратным повторением в каждой серии при различных расходах ГЭС позволяют составить достаточно полное представление о скоростном поле потока в нижнем бьефе.

Для выяснения общего характера изменения скоростей течения в потоке рассмотрим распределение их по отдельным вертикалям. Известно, что существенные различия, или искажения, в форме имеют скоростные эпюры на вертикалях, приуроченных к участкам с резким изменением рельефа (Караушев, 1960). Поскольку в данном случае для наблюдения был выбран участок с хорошо выработанным руслом (рис. 58), ожидалось типичное для естественных условий распределение скоростей в потоке. Многократные измерения подтвердили эти предположения: по всем вертикалям наблюдалось более или менее равномерное увеличение скорости от дна к поверхности и от берегов к середине реки, поэтому и эпюры скоростей течения по форме мало отличаются друг от друга. Однако на эпюрах скоростей отдельных расходов, входящих в серию, отчетливо видно, как от точки к точке по всем вертикалям изменяется скорость во времени. Так, в первой серии расходов наибольшие изменения скорости наблюдались у правого берега, в частности на вертикалях 1 и 2 (рис. 58).

В направлении к руслу они уменьшались и наиболее устойчивая скорость течения по глубине отмечалась на вертикали 8. С приближением к левому берегу амплитуда изменения скоростей течения по вертикали снова возрастала (табл. 54). В последующих двух сериях расходов амплитуды изменения скоростей течения в большинстве точек несколько увеличились, но на вертикали 8 они опять оказались наименьшими. На-

ибольшие изменения скоростей течения сместились к вертикали 3, а в третьей серии — к вертикалям 4 и 5.

Для того чтобы проследить за изменениями скоростей течения за время измерения расходов первой серии, были построены изотакс скоростей (рис. 59). По расположению изотакс можно утверждать, что основная часть потока в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС проходит, прижимаясь к левому берегу. Во всех расходах этой серии характер расположения изотакс сохраняется, но для каждого конкретного случая намечаются некоторые особенности. Так, в скоростном поле первого расхода изотакса 1.1 м/сек. наблюдается в отдельных зонах потока, а у вертикали 7—10 появляется изотакса 1.2 м/сек. (рис. 59, а), тогда как во втором и третьем расходах рассматриваемой серии она отсутствует, а изотакса 1.1 м/сек. опускается до глубины 2 м во втором расходе (рис. 59, б) и до 4 м в третьем расходе серии (рис. 59, в). Скорости течения менее 0.5 м/сек. наблюдались лишь на мелководье у правого берега и в придонном слое. Аналогичное положение изотакс сохраняется и в четвертом расходе этой серии (рис. 59, г).

Как видно из рис. 59, при относительно постоянном расходе Рыбинской ГЭС скорости течения и распределение их в потоке изменяются очень незначительно. Однако с уменьшением расхода картина становится иной. При расходе ГЭС, равном $700 \text{ м}^3/\text{сек.}$ по всему створу, в придонных слоях скорости течения оказываются менее 0.5 м/сек.

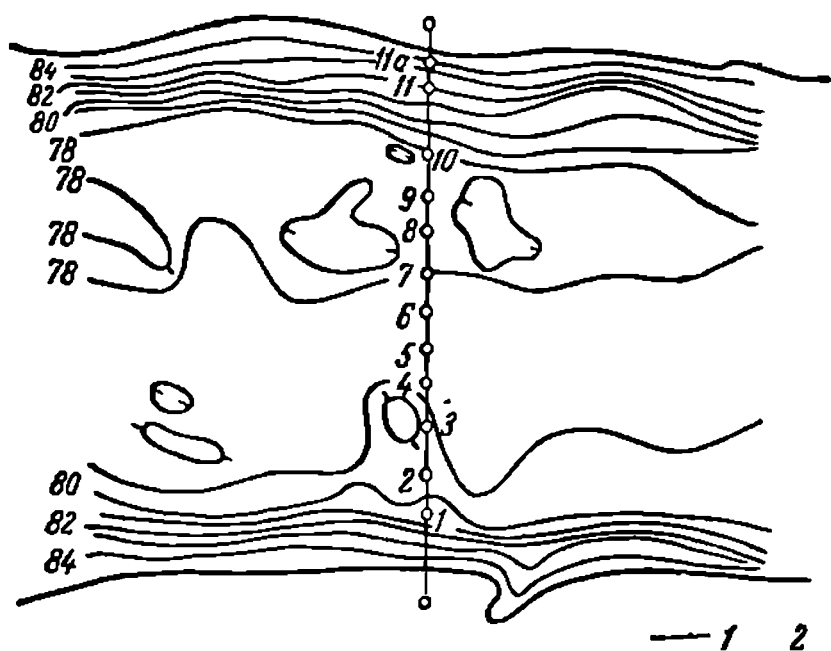


Рис. 58. План участка и положение скоростных вертикалей в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС.

1 — горизонталы дна; 2 — скоростная вертикаль.

Амплитуда скоростей течений (в м/сек.) в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС при различных расходах

Серия, время измерения и величина расходов	Горизонт наблю- дений, м	Вертикаль										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
I; 15 час. 02 мин. — 16 час. 50 мин.; 1359—1379 м³/сек.	Поверхность	0.14	0.07	0.10	0.10	0.03	0.02	0.03	0.00	0.02	0.01	0.05
	0.2	0.06	0.06	0.06	0.06	0.00	0.03	0.05	0.01	0.05	0.08	0.00
	0.6	0.04	0.10	0.04	0.01	0.09	0.08	0.13	0.02	0.08	0.09	0.05
	0.8	0.11	0.12	0.01	0.08	0.03	0.04	0.06	0.03	0.11	0.18	0.07
II; 13 час. 54 мин. — 16 час. 03 мин.; 991— 1035 м³/сек.	Дно	0.06	0.14	0.09	0.01	0.03	0.03	0.13	0.00	0.09	0.09	0.00
	Поверхность	0.04	0.04	0.11	0.05	0.08	0.07	0.08	0.04	0.09	0.28	0.02
	0.2	0.10	0.10	0.13	0.07	0.04	0.03	0.10	0.04	0.04	0.12	0.10
	0.6	0.06	0.12	0.09	0.07	0.08	0.16	0.11	0.11	0.09	0.15	0.04
III; 13 час. 07 мин. — 15 час. 01 мин.; 726—785 м³/сек.	0.8	0.07	0.16	0.15	0.11	0.11	0.10	0.08	0.04	0.11	0.05	0.07
	Дно	0.04	0.04	0.09	0.14	0.14	0.03	0.10	0.15	0.08	0.09	0.07
	Поверхность	0.06	0.07	0.02	0.07	0.05	0.02	0.17	0.07	0.04	0.19	0.03
	0.2	0.12	0.11	0.10	0.11	0.08	0.06	0.15	0.04	0.07	0.10	0.10
	0.6	0.03	0.06	0.12	0.13	0.09	0.07	0.06	0.05	0.09	0.15	0.03
	0.8	0.04	0.02	0.07	0.06	0.12	0.14	0.04	0.07	0.08	0.07	0.06
	Дно	0.10	0.02	0.06	0.05	0.08	0.05	0.12	0.07	0.05	0.09	0.08

Анализ результатов измерения скоростей течения в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС выявил не только заметную пульсацию скоростей течения в различных точках поперечного сечения потока, но и существенные изменения их при различных режимах работы ГЭС (табл. 55).

Материалы суточной станции, выполненной 30 июля 1957 г., показали, что скорость течения на поверхности в течение суток изменялась от 0.17 до 1.37 м/сек. С глубиной она постепенно уменьшалась, но и в придонном слое (0.5 м от дна) суточная амплитуда скорости по ежечасным измерениям равнялась 0.56 м/сек. Между отдельными сроками наблюдений возможно резкое уменьшение или увеличение скорости течения. Так, между 18 и 20 часом 30 июля 1957 г. скорость течения по всей вертикали уменьшилась в 3 раза.

Влияние режима работы Рыбинской ГЭС на изменение скорости течения Волги прослеживается почти до г. Ярославля. Так, если средняя скорость течения от г. Рыбинска до пос. Песочного во время минимального сброса ГЭС 31 июля 1957 г. была порядка 0.26—0.36 м/сек., то вниз по течению с началом интенсивного сброса ГЭС при таком же характере речной долины она заметно увеличилась и на участке от пос. Песочного до г. Ярославля колебалась от 0.36 до 0.64 м/сек.

Горьковское водохранилище по скоростному режиму резко отличается от Рыбинского и ближе

к Ивановскому и Угличскому. Некоторое общее представление о проточности данного водоема могут дать коэффициенты водообмена, указывающие на то, какая часть родной массы водоема или сколько раз вся она обменивается за определенный промежуток времени (табл. 56). В зависимости от режима работы Горьковской ГЭС и от объема стока, который в значительной степени определяется этим режимом, коэффициенты водообмена будут отклоняться от приведенных в табл. 56 значений, но при эксплуатации водохранилища в соответствии с проектным графиком сработки эти отклонения невелики. Исключения могут быть лишь в период весеннего наполнения водохранилища.

Как показывают данные таблицы, наибольшая проточность наблюдается в апреле—мае, в период весеннего наполнения водохранилища. К этому времени в результате зимней сработки объем его водной массы значительно уменьшается и с началом половодья весенние воды обеспечивают наибольшую проточность водоема. С наполнением водохранилища до отметки НПУ проточность резко уменьшается. Коэффициент водообмена с июня по декабрь редко превышает 0.50. Только с началом интенсивной сработки водохранилища в январе он заметно увеличивается и с этого момента по апрель остается выше, чем в летне-осенний период. В течение года условная водная масса водохранилища обменивается 6—7 раз.

Расчетные данные по водообмену Горьковского водохранилища подтверждаются фактическими материалами наблюдений над течениями (Бвторин, 1958а, 1958б, 1959а). О характере изменения скорости течения в русле Волги по длине Горьковского водохранилища можно судить по рис. 60. Порядок величин поверхностной, придонной и средней скоростей течения по русловым вертикалям от г. Рыбинска до Горьковской ГЭС показан в табл. 57. На рис. 60 отчетливо прослеживается общая тенденция уменьшения средней скорости течения по длине водохранилища. Если на участке от г. Рыбинска до г. Тутаева скорость течения мало отличается от скорости в естественных условиях реки, то ниже г. Тутаева

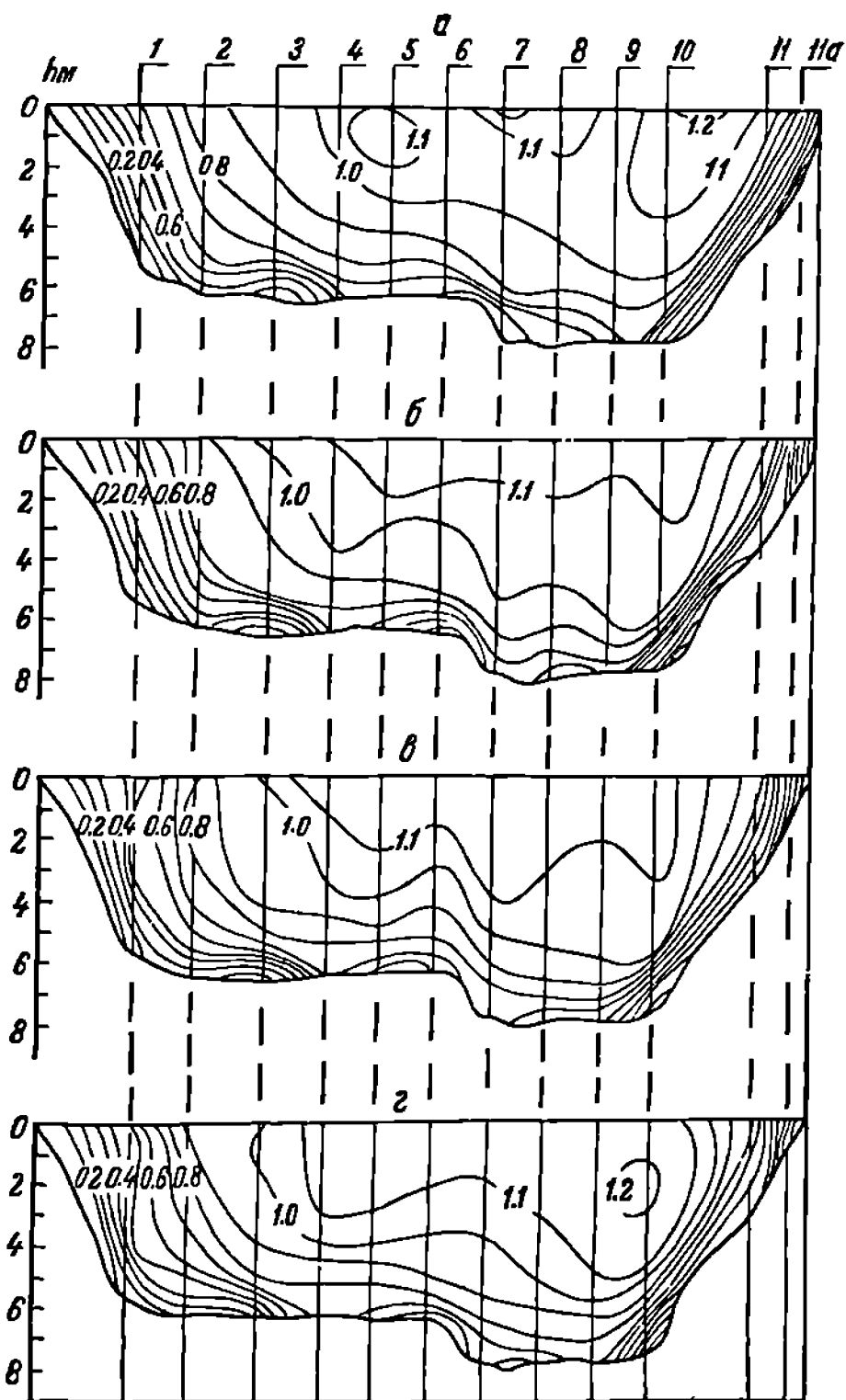


Рис. 59. Распределение скоростей течения в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС при сбросном расходе 1300 м³/сек.

а — расход № 1; б — расход № 2; в — расход № 3; г — расход № 4.

Т а б л и ц а 55

Скорости течения в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС
при различных расходах в 1956 г.

Дата	Расход ГЭС, м сек.	Номер изме- ренных рас- ходов	Расчетный уровень, м	Расход ГЭС, м сек.	Средняя ско- рость, м сек.	Макси- мальная ско- рость, м сек.
31 X	1359—1379	1	1.08	1334	0.88	1.35
		2	1.10	1359	0.89	1.15
		3	1.12	1366	0.90	1.21
		4	1.11	1379	0.90	1.21
1 XI	991—1035	1	0.64	1030	0.74	1.04
		2	0.64	1033	0.74	1.03
		3	0.66	991	0.70	0.97
		4	0.67	1017	0.72	1.02
		5	0.66	1035	0.74	1.01
2 XI	726—785	1	0.24	782	0.60	0.86
		2	0.25	726	0.56	0.79
		3	0.26	768	0.59	0.79
		4	0.24	772	0.59	0.82
		5	0.24	785	0.60	0.79

Т а б л и ц а 56

Месячные и годовые коэффициенты водообмена Горьковского водохранилища

Год	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	За год
1956	0.90	0.73	0.36	0.44	1.14	0.54	0.49	0.47	0.45	0.46	0.45	0.52	4.9
1957	0.81	0.70	0.56	1.41	1.41	0.47	0.68	0.36	0.39	0.54	0.55	0.52	6.8
1958	0.63	0.75	0.94	1.33	1.49	0.58	0.43	0.40	0.36	0.40	0.35	0.42	7.3
1959	0.54	0.59	0.62	1.11	0.63	0.39	0.45	0.34	0.32	0.36	0.30	0.37	5.6

она заметно уменьшается. Особенно резкое снижение скорости течения наблюдается ниже г. Кинешмы. Уже на второй год существования водохранилища скорость в этом районе составляла лишь 50% от величины, зарегистрированной в реке (Буторин, 1963а).

В расширенной части Горьковского водохранилища течение инструментально отмечается в редких случаях, так как скорость его обычно ниже чувствительности приборов. Лишь в отдельных случаях на русловых вертикалях приплотинного участка на глубине от 2 до 6 м зарегистрирована скорость течения порядка 0.04—0.08 м/сек. С приближением к Горьковской ГЭС течение заметно усиливается, особенно по руслу Волги и в некоторых случаях скорость его достигает значительной величины. Об этом свидетельствуют отдельные измерения скоростей течения в данном районе и материалы наблюдений на суточных станциях, выполненных в августе 1956 и 1957 гг. (табл. 41). На всех горизонтах наблюдений в этот период зафиксировано течение, скорость которого значительно превышает величины выше расположенного озеровидного участка водоема и колеблется в течение суток в широких пределах. Такое увеличение скорости течения вблизи ГЭС связано с режимом работы электростанции.

Вертикальное распределение скорости потока на бывшем русле Волги у Ярославля, Костромы и Кинешмы представлено эпюрами скоростей на рис. 61. Вертикальное распределение скоростей течения в бывшем русле Волги, за исключением приплотинного участка, близко к распределению скоростей в естественных условиях реки. На большинстве стан-

Скорости течения на участке водохранилища от г. Рыбинска до г. Чкаловска

Номер станций	Скорость течения, м/сек.			Номер станций	Скорость течения м/сек.		
	поверхностная	придонная	средняя		поверхностная	придонная	средняя
Участок выклинивания подпора				Переходный участок			
3	0.34	0.22	0.33	33	0.29	0.22	0.29
5	0.36	0.17	0.29	35	0.31	0.20	0.28
7	0.69	0.56	0.63	36	0.28	0.15	0.22
8	0.60	0.41	0.53	37	0.28	0.10	0.22
9	0.51	0.39	0.42	38	0.24	0.20	0.22
10	0.56	0.09	0.35	39	0.29	0.27	0.26
11	0.60	0.42	0.52	40	0.15	0.12	0.12
14	0.47	0.32	0.44	43	0.29	0.23	0.14
15	0.53	0.44	0.50	44	0.23	0.17	0.26
16	0.49	0.32	0.39	45	0.27	0.12	0.24
17	0.44	0.34	0.36	46	0.26	0.11	0.17
19	0.42	0.26	0.35	47	0.23	0.10	0.15
20	0.32	0.25	0.28	49	0.14	0.12	0.13
21	0.34	0.21	0.25	50	—	0.11	—
23	0.40	0.32	0.35	52	0.15	>0.04	—
24	0.37	0.25	0.34	57	>0.04	>0.04	—
25	0.25	0.24	0.31	Приплотненный участок			
27	0.40	0.23	0.26	67	>0.04	>0.04	—
28	0.32	0.20	0.28				
29	0.44	0.28	0.33				
30	0.32	0.16	0.27				
31	0.34	0.28	0.31				
32	0.27	0.19	0.24				

П р и м е ч а н и е. Нумерация станций соответствует таковой на рис. 10.

ций максимальная скорость потока наблюдалась в подповерхностном слое на глубине 0.5—2.0 м.

Распределение скоростей течения по поперечному сечению водохранилища на участке выклинивания подпора и ниже иллюстрируют данные



Рис. 60. Изменение скоростей течения по длине Горьковского водохранилища.

табл. 58. Наибольшие скорости на поверхности и у дна наблюдаются на русловых станциях и на станциях вогнутого приглубого правого берега. К левому берегу скорость течения постепенно уменьшается

На распределение скоростей течения в зоне подпора существенное влияние оказывает площадь поперечного сечения водоема. В ней сравнительно узкие участки чередуются со значительными расширениями. Естественно, что при прочих равных условиях скорости стоковых течений

Скорости течения (в м сек.) по поперечному сечению Горьковского водохранилища на участке выклинивания подпора в июле—августе 1957 г.

Дата	Пот жение ра рза по померам рус- ловой стан- ции	Правая пойма		Русло		Левая пойма	
		поверхностная	при- дон- ная	поверхностная	при- дон- ная	поверхностная	при- дон- ная
31 VII	5	0.36 (80 м от пра- вого берега)	0.28	0.36	0.17	0.36 (150 м от ле- вого берега)	0.26
31 VII	11	0.56 (75 м от пра- вого берега)	0.36	0.56	0.09	0.22 (80 м от ле- вого берега)	0.15
2 VIII	25	0.37 (150 м от пра- вого берега)	0.25	0.25	0.24	0.24 (150 м от ле- вого берега)	0.11
4 VIII	41	0.15 (30 м от пра- вого берега)	0.12	0.26 (400 м от пра- вого берега)	0.15	— (300 м от ле- вого берега)	—
4 VIII	47	0.23 (300 м от пра- вого берега)	0.10	—	—	0.23 (250 м от ле- вого берега)	0.11

Примечание. Расстояние станций от берега определялось визуально.

в местах с наибольшими площадями водного сечения будут меньше, чем на более узких участках. Это хорошо видно при сопоставлении результатов измерения скоростей течения на двух русловых станциях приплотинного участка, представленных в табл. 59. Поскольку протяженность

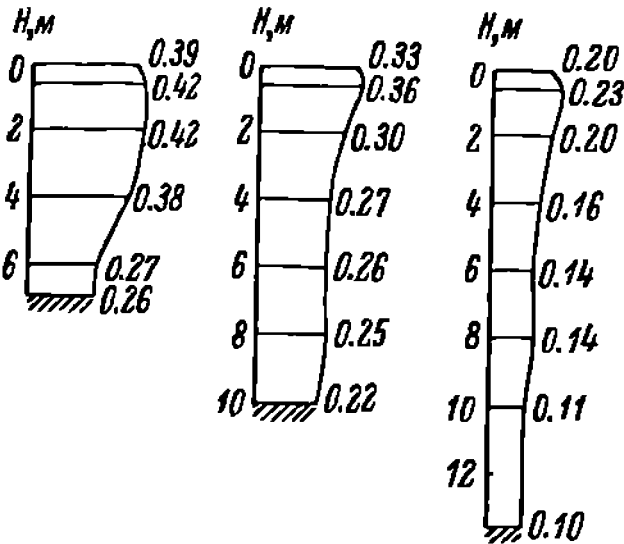


Рис. 61. Эпюры скоростей течения на речном участке Горьковского водохранилища в 1957 г.

а — у г. Ярославля; б — у г. Костромы; в — у г. Кинешмы.

первого створа (I) при НПУ составляет 6900 м, а второго (II) — 3700 м, скорости течения на станции первого створа значительно меньше, чем на станции второго, несмотря на то что первый створ расположен ближе к зоне выклинивания подпора.

Кроме стоковых, в Горьковском водохранилище иногда отмечаются ветровые течения. Они особенно заметны в районе городов Юрьевца и Чкаловска, где слабо выражены стоковые течения. Так, 15 сентября 1956 г. при восточном ветре скоростью 5.3 м/сек. на русловой станции юрьевецкого створа на глубине 0.5 м наблюдалось течение северо-западного направления скоростью 0.09 м/сек. На глубине 4 м течение имело

юго-восточное направление и скорость 0.11 м/сек. Ветровые течения в этом районе отмечались довольно часто, но подробно они не изучались.

Н. А. Ярославцевым (1961) обнаружены в Горьковском водохранилище вдольбереговые течения. Как установил этот исследователь, они являются следствием ветрового волнения и образуются при подходе волн к берегу под углом более 15°. Скорость их даже при слабом волнении превышает 0.10 м/сек., а при высоте волн 1 м и более достигает 0.50—0.80 м/сек. Максимальные скорости течения наблюдаются вблизи уреза. Вне зоны

Распределение скоростей течения (в м/сек.) на I и II створах
Горьковского водохранилища в 1958 г.

Глубина, м	I	II	I	II	I	II
	30 V	30 V	1 IX	30 VIII	6 X	7 X
Поверхность	—	0.18	0.07	0.12	—	—
3.0	0.10	0.19	0.05	0.15	0.05	0.05
6.0	—	0.17	0.03	0.06	0.04	0.06
9.0	—	0.15	—	—	—	—
12.0	0.11	0.15	—	—	—	—

разрушения волн они значительно уменьшаются. При подходе волн по нормали к урезу воды образуются разрывные течения, представляющие собой ряд сходящихся и расходящихся циркуляционных токов воды со скоростями, не превышающими 0.30 м/сек. Эти течения играют важную роль в формировании прибрежной отмели и насыщении водной массы продуктами ее размыва. Вдольбереговые течения существуют и в других водоемах каскада, но так подробно, как в Горьковском водохранилище, они нигде не изучались.

Итак, общая схема циркуляции вод в Горьковском водохранилище значительно проще, чем в Рыбинском, и определяется в основном движением вод по руслу Волги.

После перекрытия Волги в районе Жигулевских гор резко изменился ее скоростной режим в зоне подпора Куйбышевского водохранилища. Это выразилось прежде всего в значительном уменьшении средней скорости потока (Буторин, 1958в, 1960, 1963б). Изменения скоростного режима Волги на участке Куйбышевского водохранилища довольно схожи с таковыми в Горьковском водохранилище. Общая картина, согласно нашим материалам, представляется следующей.

В период весеннего заполнения Куйбышевского водохранилища в 1956 г. течение отчетливо прослеживалось по всей его длине и скорость течения даже в районе сел. Березовки на отдельных горизонтах достигала 0.38 м/сек. В это время на березовском створе течение наблюдалось и на пойменных станциях, причем скорость его в поверхностном слое была порядка 0.20 м/сек. С приближением к зоне выклинивания подпора скорость течения быстро возрастала. Уже у дер. Ундоры на бывшем русле Волги она превышала 0.50 м/сек., а у пос. Камское Устье была выше 1 м/сек. В этом районе высокие скорости течения наблюдались и на пойменных станциях. Выше Казани весной 1956 г. сохранился скоростной режим Волги, существовавший до сооружения Волжской ГЭС.

В первый год весенне-летнего заполнения водохранилища повышение его уровня при максимальной отметке над меженным уровнем 1955 г. составляло около 18 м и выклинивание подпора на Волге происходило между Казанью и сел. Вязовые, а на Каме — между сел. Рыбная Слобода и г. Чистополем. С повышением уровня и расширением зоны подпора на значительном протяжении Волги вверх от плотины ГЭС отмечалось резкое уменьшение скоростей течения. Особенно существенные изменения в скоростном режиме происходили на участке от плотины ГЭС до Казани. На этом участке скорости течения от плотины до дер. Ундоры даже по бывшему руслу Волги обычно были ниже 0.10 м/сек., а на пойменных станциях они практически отсутствовали. Выше Ундор до Казани в известной степени сохранился режим течений реки и средняя скорость потока у Ундор в бывшем русле Волги достигала 0.33 м/сек., а на пойменных станциях — 0.16 м/сек. Такого же порядка была средняя скорость

в бывшем русле Камы у сел. Алексеевского. Заметно уменьшилась скорость течения выше Казани. От Казани до Чебоксар средняя скорость потока в бывшем русле Волги была ниже 0.50 м/сек. и лишь в районе городов Чебоксары и Козьмодемьянска она оставалась достаточно высокой и в отдельных случаях достигала 0.90 м/сек. Подобные же скорости сохранялись в течение всего летне-осеннего периода 1956 г. на участке распространения подпора. Таким образом, уже в первый год заполнения водохранилища скоростной режим Волги в зоне подпора претерпел существенные изменения, особенно на участке водохранилища от плотины до дер. Ундоры.

Заполнение водохранилища продолжалось и весной 1957 г. В этот период скорости течения на участке водохранилища от плотины до дер. Ундоры были настолько малы, что вертушкой не улавливались. Лишь в непосредственной близости от плотины в некоторых случаях, вероятно, при работе турбин ГЭС и одновременном пропуске воды через водосливные сооружения, наблюдалось заметное течение, скорость которого в районе сел. Березовки достигала иногда 0.30 м/сек. на поверхности и 0.15 м/сек. у дна. Выше дер. Ундоры хотя и прослеживалось отчетливо выраженное течение, но скорость его по сравнению с весной 1956 г. уменьшилась почти в 2 раза, а у г. Тетюшей — более чем в 2 раза.

В июне 1957 г. заполнение водохранилища до проектной отметки закончилось и уровень его над естественным меженим горизонтом Волги был поднят примерно на 28 м. Выклинивание подпора при таком уровне происходило около г. Чебоксар на Волге и в районе устья Вятки на Каме. Значительный подъем уровня и распространение подпора вверх от плотины вызвало уменьшение проточности на новых участках водохранилища. В летне-осенний период течение от плотины до пос. Камское Устье отмечалось вертушкой в редких случаях и скорость его от сел. Березовки до г. Тетюшей даже в бывшем русле Волги была ниже 0.10 м/сек. Скорости течения на пойме и в придонном слое на этом участке инструментально вообще не улавливались. Некоторые признаки речного потока летом 1957 г. наблюдались лишь выше пос. Камское Устье, где скорость течения на русловых вертикалях колебалась от 0.24 до 0.29 м/сек. в поверхностном слое и отчетливо прослеживалась до дна, уменьшаясь до 0.14—0.17 м/сек. От пос. Камское Устье до г. Казани течение отмечалось и на пойменных станциях, хотя скорости его не превышали 0.15 м/сек.

На участке водохранилища от Казани до Чебоксар скоростной режим более всего приближался к режиму реки. Скорость течения в поверхностном слое воды вдоль старого русла Волги колебалась от 0.23 до 0.38 м/сек., а у дна — от 0.14 до 0.31 м/сек. Хотя средние скорости течения на этом участке были значительно ниже, чем раньше и в реке, общие закономерности распределения скоростей сохранились. Таким образом, в Куйбышевском водохранилище, как и в Горьковском, по мере приближения к зоне выклинивания подпора скорости течения постепенно увеличивались и только выше выклинивания подпора они соответствовали скоростям течения реки в естественных условиях. Летом 1957 г. такое явление наблюдалось в районе г. Васильурска, когда средняя скорость на русловой вертикали превышала 0.80 м/сек. и течение захватывало все сечение реки (рис. 62).

В зоне распространения подпора течение на пойменных станциях инструментально наблюдалось в редких случаях, особенно от плотины до пос. Камское Устье. Поэтому судить о распределении скоростей потока по поперечному сечению водоема на этом участке не представляется возможным. Выше пос. Камское Устье течение прослеживалось и на пойменных станциях. Некоторые сведения о распределении скоростей течения

Скорости течения (в м сек.) на различных участках
Куйбышевского водохранилища в августе 1957 г.

Дата	Положение разреза	Правая пойма		Русло		Левая п йма	
		поверхност- ная	при- донная	поверхност- ная	при- донн а	повер ност- ная	при- донная
15 VIII	Выше выклини- вания подпора	0.45 (30 м от пр. б.)	0.31	0.62 (250 м от пр б.)	0.54	0.40 (150 м от лев. б.)	0.32
16 VIII	В районе выкли- нивания под- пора	0.42 (40 м от пр. б.)	0.27	0.28 (300 м от лев. б)	0.20	0.26 (30 м от лев. б.)	0.20
16 VIII	На участке Че- боксары—Ка- зань	0.12 (100 м от пр. б.)	—	0.24 (300 м от пр. б.)	0.20	0.27 (500 м от пр. б.)	0.16
19 VIII	На участке Ка- зань—Камское Устье	0.10 (30 м от пр. б.)	—	0.12 (400 м от пр. б.)	0.10	0.04 (1200 м от пр. б.)	—
19 VIII	В районе Со- кольих Гор	0.19 (100 м от пр. б.)	0.14	0.19 (600 м от пр. б.)	0.12	0.09 (50 м от лев. б.)	0.08
20 VIII	У Камского Устья	0.14 (100 м от пр. б.)	0.11	0.18 (1200 м от вр. б.)	0.08	— (400 м от лев. б.)	—

П р и м е ч а н и е. Расстояние от станций до берега (пр. — правого или лев. — левого) опре-
делялось визуально.

по поперечному сечению можно почерпнуть из данных табл. 60. Мак-
симальные скорости течения на поверхности и у дна, как правило, на-
блюдались на русловых станциях, при этом скорости в поверхностном
слое заметно превышали придонные. К берегам скорость течения посте-
пенно уменьшалась, но на правобережной пойме она была обычно зна-
чительно выше, чем на левобережной.

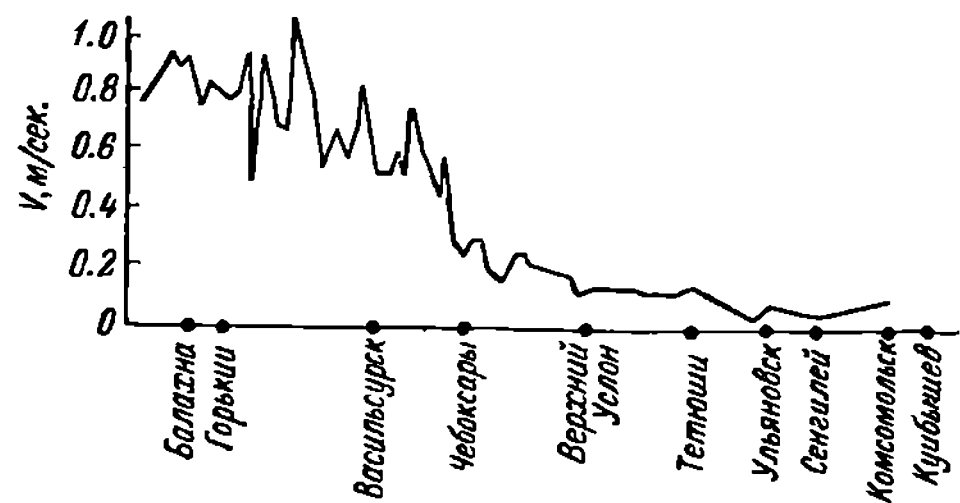


Рис. 62. Изменение скоростей течения по длине Куй-
бышевского водохранилища.

Исследования А. И. Елисеева (1963) и П. Ф. Чигиринского (1962)
подтвердили в общих чертах наши представления о скоростном режиме
Куйбышевского водохранилища. При значительной проточности водо-
хранилища перемещение вод в нем осуществляется в основном стоковыми
течениями, а в период ледостава — исключительно ими. Стоковые те-
чения зимой придерживаются преимущественно бывшего русла Волги,
но при ширине водохранилища в 5—6 км захватывают и пойменные
участки. Скорость течения может колебаться в широких пределах, но мак-
симальные значения ее отмечаются в большинстве случаев на 0.5—
0.6 II глубины.

Общая картина перемещения водных масс в Куйбышевском водохранилище показана на схеме (рис. 63), составленной П. Ф. Чигиринским (1966) для глубины 3 м. Здесь отчетливо прослеживается динамическая ось перемещения водных масс, которая при стоковом течении проходит по бывшему руслу Волги и Камы, где наблюдаются наибольшие скорости их. В некоторых местах водохранилища, особенно там, где резко меняется глубина и конфигурация берегов, образуются завихрения, которые

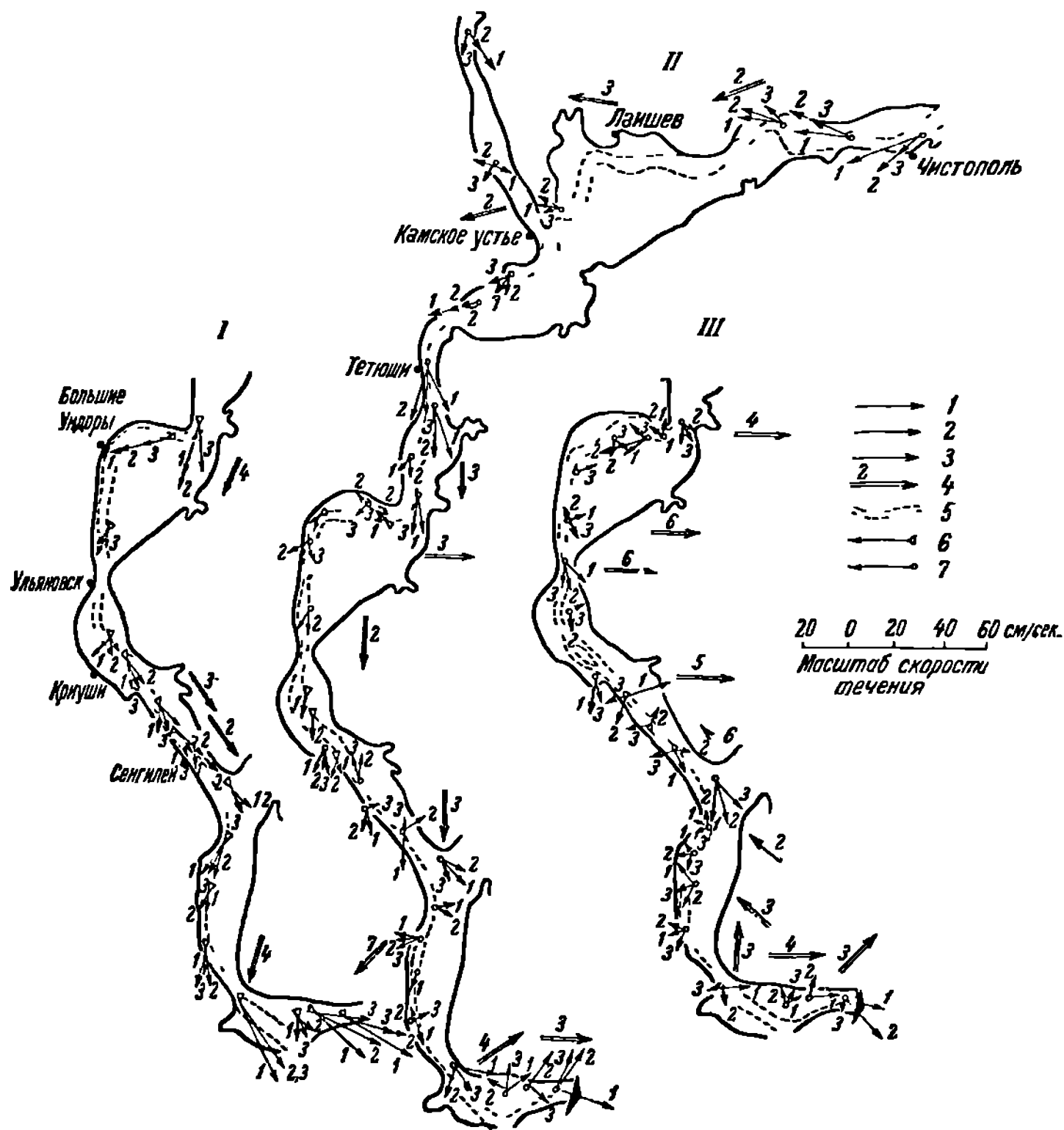


Рис. 63. Схема течений в Куйбышевском водохранилище по продольному разрезу в мае (I), июле (II) и октябре (III) (по П. Ф. Чигиринскому, 1966).

1 — скорость и направление течения у поверхности; 2 — скорость и направление течения на 0.5 м; 3 — скорость в направлении течения у дна; 4 — скорость и направление ветра; 5 — порожнее русло Волги и Камы; 6 — данные за 1960 г.; 7 — данные за 1961 г.

иногда изменяют направление течения на противоположное. В водохранилище встречаются также районы с такими слабыми течениями, что судить о направлении перемещения водных масс в них весьма затруднительно.

Интересные данные о перемещении водных масс на приплотинном участке водохранилища получил А. И. Елисеев (1963). Здесь особенно четко прослеживается изменчивость течений по длине участка и улавливается зависимость динамики водных масс от режима работы гидросооружений. Так, в весенний период с увеличением притока воды в водохранилище происходит холостой сброс воды в нижний бьеф через водосливную

плотину срок открытия затворов в которой устанавливается в зависимости от развития половодья. С открытием водосливной плотины сброс воды из водохранилища увеличивается и скорости течения в этот период отмечаются по всей ширине рассматриваемого участка (рис. 64, а). В летне-осенний период, когда скоростной режим участка определяется только сбросом воды через турбины ГЭС, постоянное стоковое течение наблюдается лишь вдоль правого берега затопленного русла Волги (рис. 64, б). По левобережью участка, вблизи аванпорта, течение слабое и возникает периодически во время забора воды на шлюзование. В зимний период скоростной режим участка определяется величиной сбросного расхода и его колебаниями из-за неравномерной нагрузки и непостоянства режима работы ГЭС. Распределение скоростей течения в плане в этот период несколько отличается от летне-осеннего. Как видно из рис. 64, в, течение зимой наблюдается и на левобережной пойме, причем вблизи левого берега появляется незначительное завихрение потока, при котором могут возникать обратные течения.

В период открытой воды на перемещение вод в водохранилище существенное влияние оказывает ветер, роль которого весной невелика, так как в это время весьма интенсивны стоковые течения. Достаточно отметить, что в зонах выклинивания подпора скоростной режим по бывшим руслам Волги и Камы около месяца соответствует режиму, наблюдавшемуся ранее на спаде половодья этих рек.

Ниже устья Камы скорости течения в водохранилище в 2—3 раза меньше, чем в естественных условиях, но абсолютные их значения достигают на отдельных участках значительных величин. Так, максимальная скорость течения у г. Тетюши в этот период равняется 1.29 м/сек., у г. Ульяновска — 0.80 м/сек., а у г. Тольятти — 0.66 м/сек. С окончанием наполнения водохранилища стоковые течения ослабевают и происходит затухание скорости течения. В связи с этим роль ветра в динамике вод увеличивается.

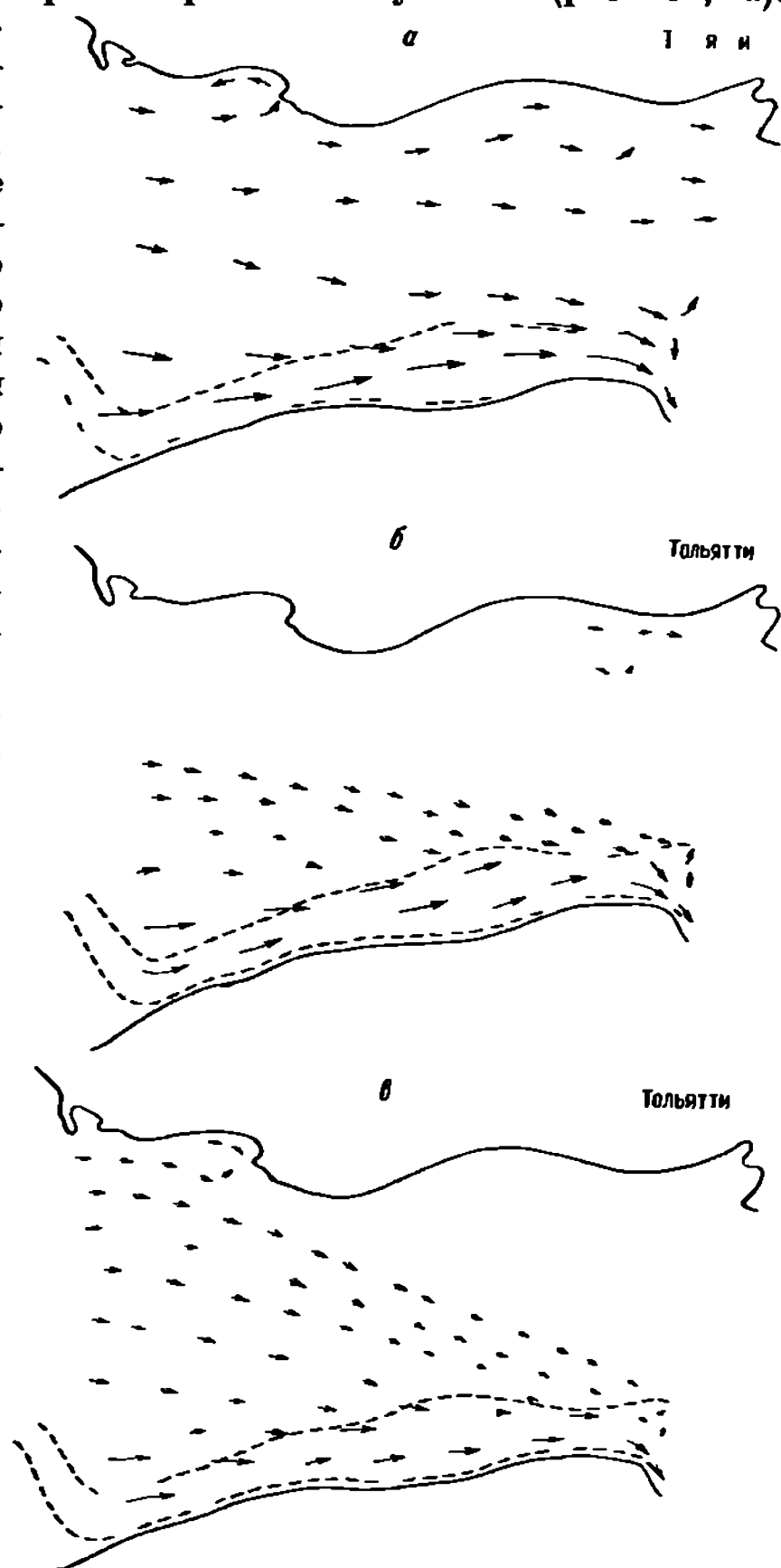


Рис. 64. Схема течений на приплотинном участке Куйбышевского водохранилища весной 1962 (а), летом 1961 (б) и зимой 1962 г. (в) (по А. И. Елисееву, 1963).

При слабых ветрах ветровые течения развиваются только в верхних слоях воды и лишь при значительной скорости ветра они оказывают воздействие на всю массу воды в водоеме. Обычно в озеровидных расширениях водохранилища перемещение вод под действием ветра совпадает с направлением ветра, а скорость ветрового течения на глубине 2 м составляет 0.4—7.0% скорости ветра (Чигиринский, 1962). На русловых участках водохранилища ветровые течения накладываются на стоковое и частично изменяют его скорость и направление. В зависимости от скорости и направления ветра скорость течения в русле изменяется в больших пределах — от 0.02—0.03 до 0.40 м/сек., а во время значительных продольных перекосов водной поверхности в узкостях она может увеличиваться до 0.60 м/сек. (Чигиринский, 1962).

По скоростному режиму существенно отличается от других волжских водохранилищ Волгоградское. До сооружения Волжской ГЭС им. XII съезда КПСС скорости течения на участке Волги, позднее затопленном, достигали значительной величины. Так, замеренные нами летом 1957 г. скорости течения от Куйбышевской плотины до Волгограда были порядка 1 м/сек. Такие скорости на русловых вертикалях сохранялись от поверхности до дна и незначительно изменялись по профилю реки, уменьшаясь к берегам. С образованием водохранилища скоростной режим резко изменился, особенно в приплотинной части верхнего бьефа.

Акватория верхнего бьефа ограничена справа коренным берегом Волги, а слева — ограждающей дамбой аванпорта. Ширина водохранилища в этом районе составляет 2.5—3.5 км. Участки с наибольшими глубинами (порядка 32—39 м) расположены в районе бывшего русла Волги, у правого берега. Примерно в 4 км выше створа плотины от основного русла ответвляется и идет к левому берегу рукав Волги (бывшая р. Ахтуба), глубины которого равняются 30—32 м. На ленобережной пойме сохранились русла двух «воложек», впадавших в Ахтубу. Территория затопленного междуречья имеет несколько поднятий, глубины над которыми не превышают 6—20 м. Такой рельеф в сочетании с работой гидротехнических сооружений обуславливает весьма сложную картину перемещения водной массы на приплотинном участке водохранилища.

Основное перемещение водной массы в водохранилище происходит по бывшему руслу Волги, ближе к его коренному берегу. Скорости течения на расстоянии 4 км к северу от ГЭС в июле—августе 1966 г. в период сбросов воды через турбины изменялись от 0.10 до 0.25—0.30 м/сек. Приближаясь к ГЭС, основной поток в соответствии с конфигурацией русла разбивается на два. Один из них продолжает двигаться вдоль правого берега водохранилища и затем поворачивает к ГЭС. Второй обгибает с восточной стороны возвышение дна (бывший остров) и далее подходит к турбинной части плотины. Скорости течения в потоках по мере приближения к плотине возрастают до 0.4—0.5 м/сек. Кроме основных потоков, в ленобережной части приплотинного участка отчетливо прослеживается движение придонных вод в сторону ГЭС по бывшему руслу «воложки».

Поверхностные слои воды (примерно до глубины 5 м) при отсутствии ветра перемещаются так же, как глубинные, и на расстоянии 3—4 км выше ГЭС имеют скорость, меняющуюся в разное время суток в пределах 0.06—0.15 м/сек.

При ветрах западной четверти в верхнем 5-метровом слое наблюдается восточный перенос вод со скоростями до 0.15—0.20 м/сек. В этом случае в юго-восточном секторе приплотинного участка возникает довольно обширная замкнутая циркуляция (рис. 65). Наибольшее развитие она получает через некоторое время после уменьшения расходов воды через турбины и захватывает не только поверхностные, но и придонные слои

воды. Очень часто такая циркуляция сохраняется и при отсутствии ветровых переносов, при этом скорость перемещения вод достигает 0.09—0.14 м/сек. В Волгоградском водохранилище так же, как и в Куйбышевском имеется циркуляционное течение в правобережном секторе приплотинного участка (в районе поворота струй основного потока), хотя и

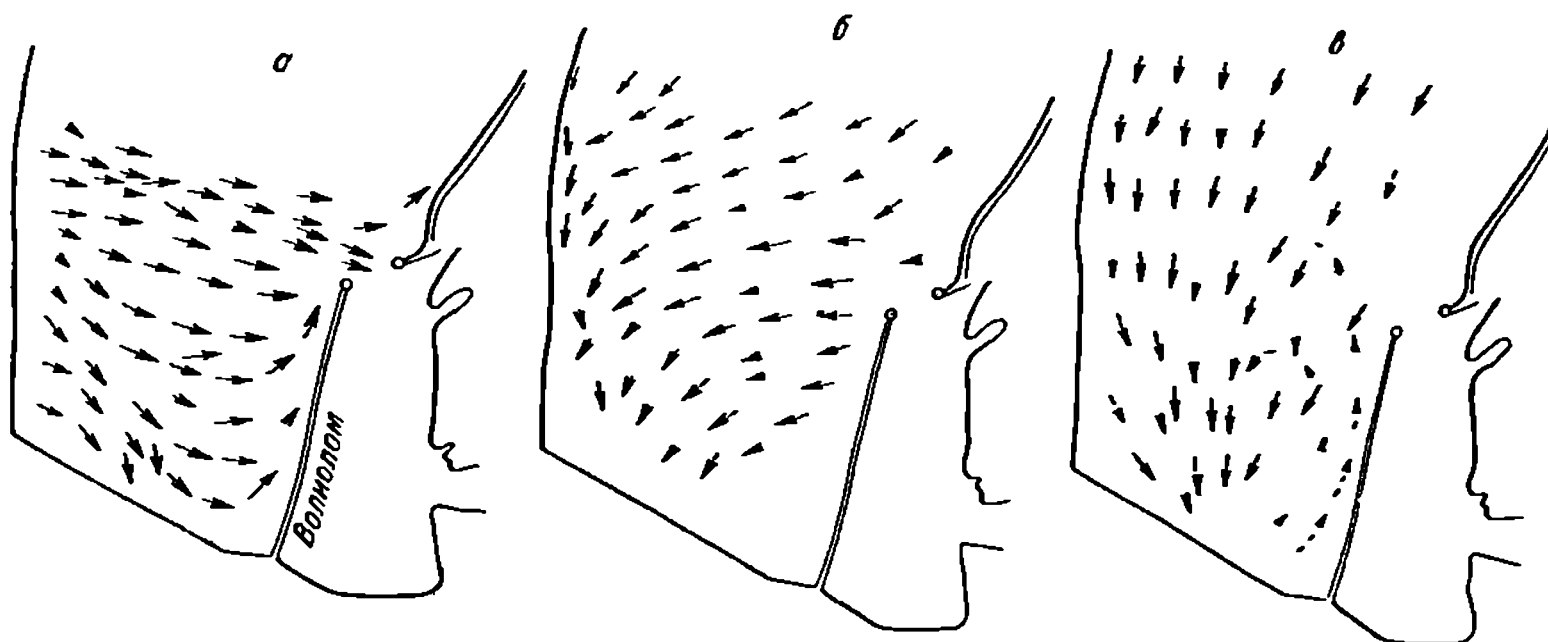


Рис. 65. Схема циркуляции вод на приплотинном участке Волгоградского водохранилища 8—10 августа 1966 г. (по А. С. Литвинову, 1968).

а — в поверхностном слое (0—5 м) при западном ветре; б — в поверхностном слое (0—5 м) при восточном ветре; в — в глубинном слое (5 м—дно).

меньшее по площади захватываемой акватории и не всегда проявляющееся.

При ветрах восточной четверти наблюдается западный перенос поверхностных слоев, которые, достигнув правого берега, вовлекаются в основной надрусловой поток. Большая нагрузка правобережных агрегатов ГЭС, как правило, вызывает усиление потока, идущего по основному

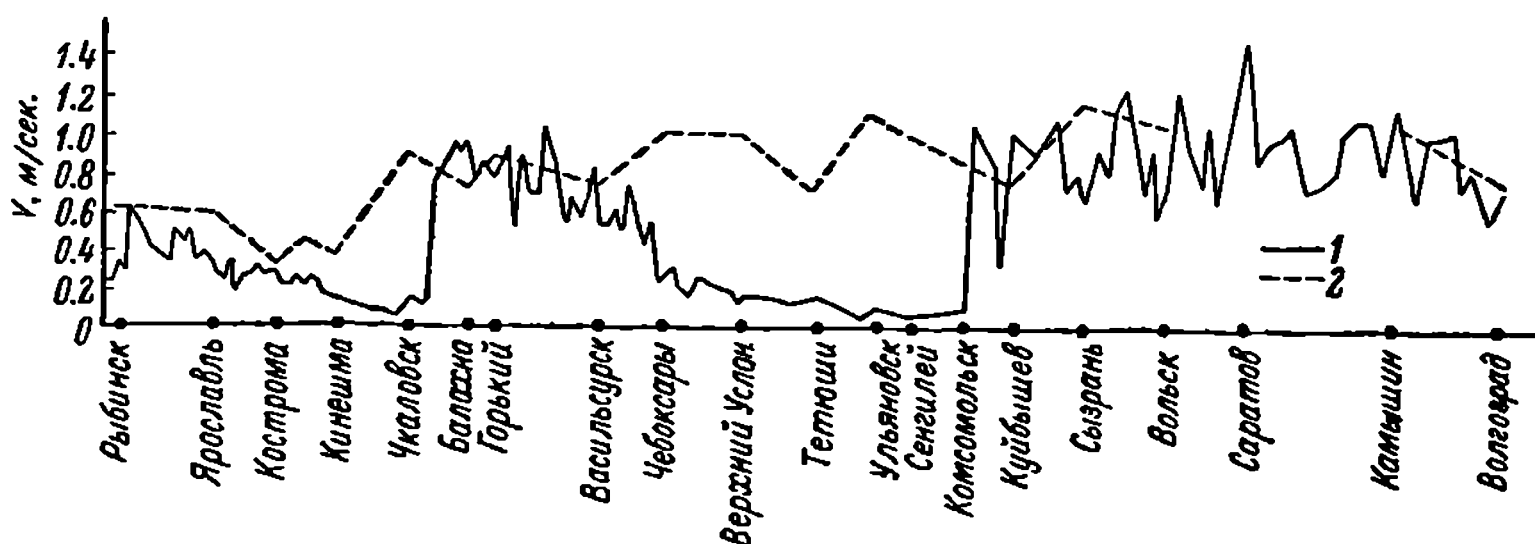


Рис. 66. Средние скорости течения по руслу Волги в летнюю межень.

1 — 1957 г.; 2 — 1921—1922 гг. (по Л. А. Бенингу, 1924).

затопленному руслу Волги вдоль западного берега водохранилища. С увеличением расходов воды через левобережные турбины несколько усиливается поток идущий в центральной части плеса и по бывшему руслу «воложки». Максимальные скорости течения по всему участку отмечаются на глубинах 15—20 м, а к поверхности и ко дну они уменьшаются.

Таким образом, на характер и скорость перемещения водной массы в Волгоградском водохранилище оказывает влияние целый ряд факторов, но решающими из них являются величина и продолжительность сбросов воды через турбины ГЭС.

Подробный анализ скоростного режима в водохранилищах долинного типа — Горьковском, Куйбышевском и Волгоградском — показал, что схема циркуляции вод в них значительно проще, чем в водоеме озерного типа — Рыбинском.

Общее представление об изменениях скорости потока по руслу Волги в связи с зарегулированием ее стока дают кривые на рис. 66. Сопоставление средних скоростей потока в летнюю межень 1921–1922 гг., по А. Л. Бенингу (1924), со скоростями, наблюдавшимися нами в 1957 г., обнаруживает существенные различия между ними. Это касается прежде всего районов распространения подпора от Горьковской и Куйбышевской плотин.

В зависимости от высоты уровня, величины уклона водной поверхности и морфометрии, а на участке подпора и от величины расхода соответствующей ГЭС скорости течения в водохранилищах испытывают значительные колебания. Для режима скоростей в условиях подпора характерно возрастание их по длине водохранилищ к зоне выклинивания подпора, а также во время весеннего наполнения и уменьшение в период летне-осенней межени. Скорости течения в верхних бьефах зависят от режима работы ГЭС. В распределении скоростей течения по поперечному сечению потока и по вертикали вне зоны подпора и в зоне переменного подпора сохраняются закономерности речного потока.

Значительная проточность водохранилищ оказывает существенное влияние на весь комплекс гидрологических процессов, протекающих в них, и прежде всего на термику этих водоемов.

Температурный режим водохранилищ

Основным фактором, определяющим температурный режим водохранилищ, является их радиационный баланс. В отдельные сезоны года существенное значение приобретают теплообмен поверхности воды с воздухом и тепловой сток притоков. Под влиянием этих факторов температурный режим водохранилищ, как и озер, значительно отличается от температурного режима рек.

Географическое положение, морфометрия и динамика вод рассматриваемых водохранилищ обуславливают существенные различия в их температурном режиме. Наблюдаются большие расхождения в значениях температуры воды даже на отдельных участках одного и того же водоема. Это хорошо видно на примере Иваньковского водохранилища.

Температурный режим каждого из плесов Иваньковского водохранилища имеет свои особенности. Уже вскрытие их происходит неодновременно. Первой вскрывается верхняя, речная часть водохранилища. Средняя дата его вскрытия у г. Калинина, согласно данным Н. А. Зиминской (1959), приходится на 10 апреля. У г. Конаково водохранилище вскрывается на 5–14 дней позднее, и последним вскрывается приплотинный участок. Естественно, что в начальный период весеннего прогрева водоема наиболее теплыми являются воды речного участка, а наиболее холодными — воды глубоководного и наименее проточного Иваньковского плеса. Об интенсивности прогрева водной массы в весенний период по длине водохранилища можно судить по данным табл. 61.

В начале весны наиболее интенсивногреваются воды речной части волжского и шопинского плесов, температура их на 2–3 выше, чем в приплотинной части водохранилища. В это время идет наполнение водоема и при высокой проточности его существенных различий в температуре вод по вертикали не наблюдается. На всех участках водохранилища вертикальная температурная стратификация неустойчива. Разность по-

Т а б л и ц а 61
Даты перехода поверхностных температур воды через 5, 10, 15
(по Н. А. Зиминовой, 1959)

Пункт	1955 г.			1956 г			1957 г		
	5	10	15	5	10	15	5	10	15
Г. Калинин . . .	3 V	12 V	6 VI	29 IV	6 V	2 VI	22 IV	26 IV	11 V
Г. Конаково . .	3 V	15 V	7 VI	1 V	8 V	4 VI	25 IV	7 V	13 V
Большая Волга	7 V	15 V	6 VI	3 V	15 V	3 VI	27 IV	3 V	15 V

верхностных и придонных температур составляет 0.3—0.5 , а максимальные значения ее не превышают 1.0—1.5 .

С уменьшением проточности в конце весны особенности распределения температуры воды отдельных плесов становятся более четкими. В глубоком озеровидном иваньковском плесе наблюдается температурное расслоение вод по вертикали (рис. 67). Разности между поверхностными и придонными температурами на глубинах 15—18 м достигают 7—9° (табл. 62).

Т а б л и ц а 62
Распределение температуры воды в русловой части Иваньковского
водохранилища в июне 1956 г.
(по В. И. Рутковскому, 1964)

Число	Час	Станция	Глубина, м	Температура, С		Разность
				поверх- ностная	придон- ная	
8	17	Нижний бьеф Иваньковской 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		Г. Конаково	10.2	21.5	14.5	7.0
10	14	Дер. Терехово	12.0	25.1	16.9	8.2
12	9	Дер. Лисицы	11.0	20.5	18.9	2.6
12	14	Дер. Перемерок	6.5	22.3	22.3	0

Сроки наступления максимальных температур воды (20—25) в водохранилище располагаются в промежутке с конца июня по начало августа и, естественно, зависят от особенностей погоды летом. Наибольшим колебаниям в летний период подвержена температура воды волжского плеса, где водохранилище переходит в реку, а наиболее плавные изменения температуры наблюдаются в верхнем бьефе ГЭС.

В период осеннего выхолаживания различия в температуре вод на отдельных участках водоема вновь уменьшаются. Водные массы находятся в стадии осенней гомотермии. Выхолаживание вод в приплотинной части верхнего бьефа идет медленнее, чем в зоне выклинивания подпора: если в последней декаде октября среднее многолетнее значение поверхностной температуры в ней 5.6°, то в волжском плесе — 4.5 (Зимина, 1959).

Термические различия между отдельными участками водохранилища в зимний период отсутствуют. По характеру вертикального распределения температур зимой выделяются лишь впадины затопленных озер. Здесь прослеживается обратная стратификация с температурой у дна 2—3 .

Толщина ледяного покрова по длине водохранилища меняется незначительно. Максимальная среднемесячная толщина льда наблюдается

в марте. На приплотинном участке Иваньковского водохранилища она равна 60—80 см, а у г. Конакова — 40—60 см.

Таким образом, ранней весной и зимой температурные условия Иваньковского водохранилища приближаются к речным, тогда как летом с установлением температурной стратификации и осенью при выхолаживании они близки к озерным.

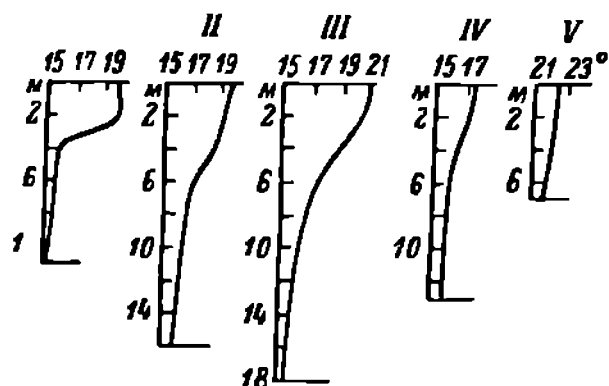


Рис. 67. Вертикальное распределение температуры в Иваньковском водохранилище в июле 1957 г. (по Н. А. Зиминской, 1959 г.).

I — устье р. Соси; II — русло Волги у дер. Корчева; III — русло Волги севернее с. Домкино; IV — русло Волги у г. Конаково; V — русло р. Шоши в 1 км выше устья р. Ламы

В связи с изменением хозяйственного использования вод того или иного водохранилища в процессе его эксплуатации отдельные характеристики режима водоема могут также существенно меняться. Это прослежено нами в Иваньковском водохранилище после сооружения Конаковской ТЭС.

Мощность первой очереди Конаковской ТЭС превышает 2 млн квт. Для охлаждения конденсаторов паратурбин требуется свыше 50 м³ воды в сек. После прохождения через конденсаторы подогретая вода через открытый отводной канал длиной 3 км и шириной 50 м, заканчивающийся

водосливом, поступает в Мошковский залив водохранилища. Последний имеет примерно такую же длину, как и отводной канал, но ширина его по течению воды увеличивается. Выход подогретых вод из этого залива в водохранилище происходит примерно в 10 км ниже водозабора.

Уже в начальном этапе эксплуатации ТЭС, когда она еще не доведена до проектной мощности, в прилегающем к ней районе Иваньковского

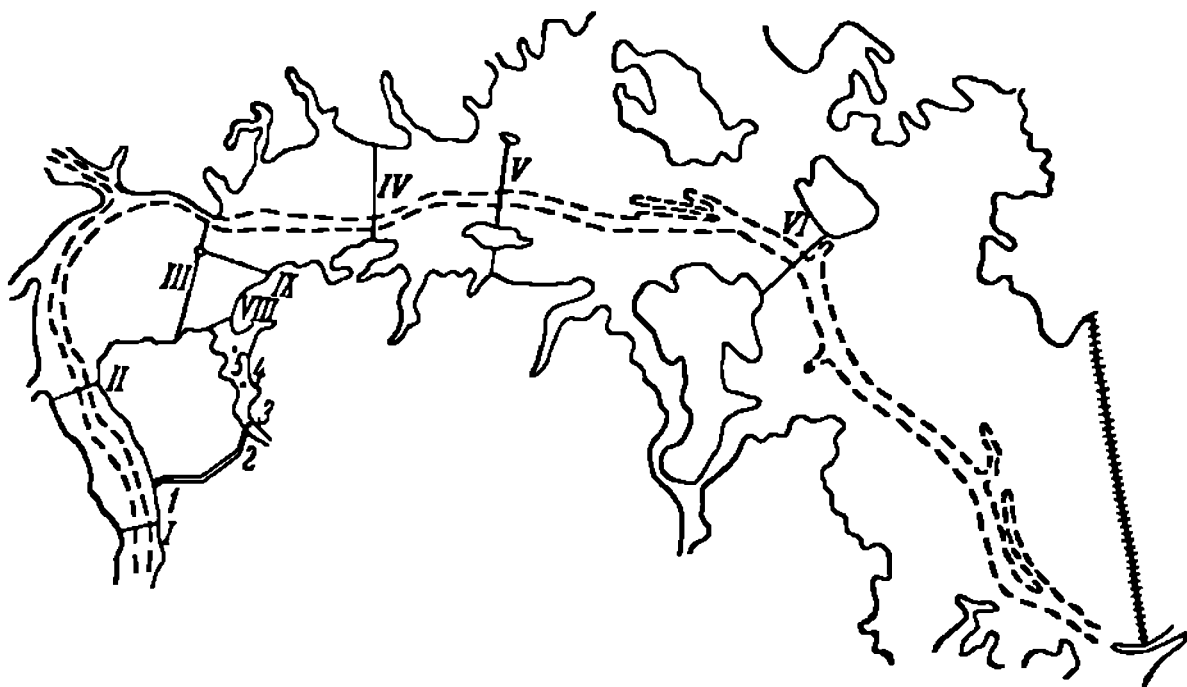


Рис. 68. Расположение разрезов и станций в Иваньковском водохранилище в районе Конаковской ТЭС.

Арабскими цифрами обозначены номера станций, римскими — номера разрезов.

водохранилища четко прослеживается влияние подогретых вод на температурный режим водоема, что особенно заметно в зимний период. Так, в феврале 1967 г. температура воды в водозаборном канале ТЭС была равна 0.4—0.5° у нижней кромки льда и 1.4° в придонном слое и соответствовала температуре на русловой вертикали разреза, расположенного выше водозабора (рис. 68). После прохождения воды через конденсаторы станции температура ее повышалась до 9.5°. Несмотря

на низкие температуры воздуха и значительную скорость течения (около 0.5 м/сек.), в отводном канале охлаждение воды было несущественным (не более чем на 0.5°) и в залив водохранилища она поступала с температурой 9°.

В заливе водохранилища в результате поступления подогретых вод образуется полынья. Длина ее в феврале 1967 г. была около 4.5 км, а максимальная ширина примерно 1 км. В марте размеры полыньи заметно увеличились: нижняя кромка ее продвинулась по руслу Волги более чем на 3 км и подошла к разрезу IV (см. рис. 68).

Основное выхолаживание подогретых вод происходит зимой в Мошковском заливе. Здесь уже на расстоянии 1 км ниже водослива температура воды в феврале 1967 г. понизилась до 7°, а при выходе из залива

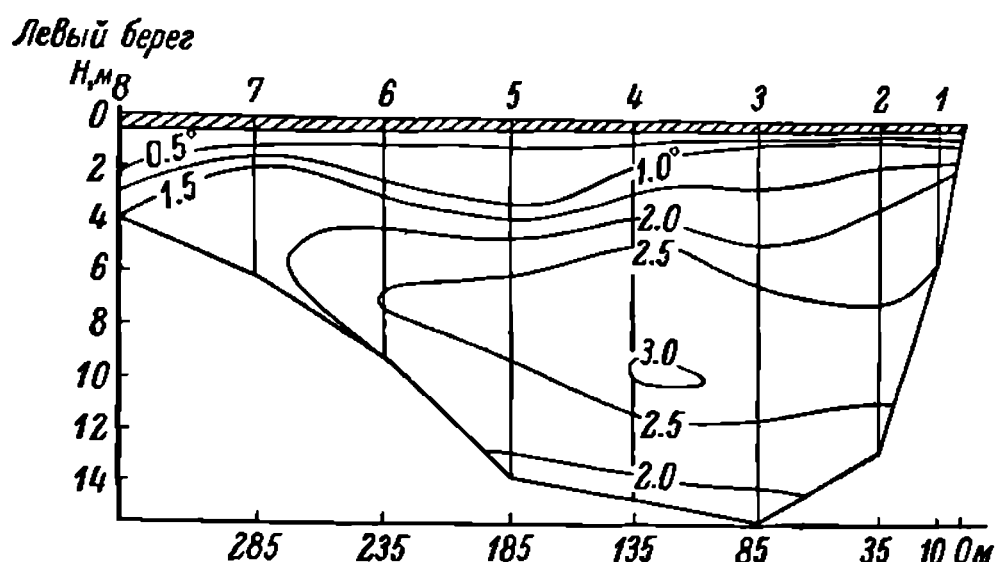


Рис. 69. Распределение температуры воды в Иваньковском водохранилище на разрезе IV в феврале 1967 г.

в водохранилище она изменялась в поверхностном слое от 0.8° у левой кромки полыньи до 5.6° у правой. В придонном слое значения температуры соответственно достигали 3.2 и 5.5°. У кромки льда в конце полыньи температура воды равнялась 0.5° в поверхностном слое и 4° у дна.

Поток теплых вод прослеживается и ниже полыньи — подо льдом. Так, на разрезе, расположенном примерно в 5 км ниже выхода залива в водохранилище, температура воды изменялась на горизонте 1 м от 0.3° у левого берега до 1.4° у правого, а в придонном слое соответственно от 1.5 до 2.5°. Ядро потока располагалось на глубине 5—11 м в центральной части русла и имело температуру до 3° (рис. 69).

Ориентировочный расчет показывает, что за счет поступления теплых вод средняя температура воды по разрезу водохранилища ниже их сброса повысилась в феврале 1967 г. на 0.8°, а в русловой части потока — на 1—1.3°. В марте 1967 г. температура воды в волжском потоке выше водозабора колебалась от 0.4 до 0.5°. Примерно такие же значения отмечались и в водозаборном канале ТЭС. Но в отводной канал вода поступала с температурой 13.8°. Как и в феврале, охлаждение воды при прохождении через отводной канал было незначительным. Несмотря на 3-метровый перепад в конце канала, образовавшийся в связи с понижением уровня водохранилища, температура воды, поступающей в Мошковский залив, почти не понижалась и составляла около 13°.

В связи с увеличением температуры воздуха в марте охлаждение воды в заливе шло медленнее, чем в феврале, и в водохранилище она поступала с температурой порядка 11°. Даже в конце полыньи температура воды в поверхностном слое была 6.4°, а у дна — 5.5°. По расчетным данным, повышение температуры воды на разрезе ниже залива по срав-

нению с ее значениями выше водозабора в марте составляло уже около 2° , т. е. было почти в 2 раза больше, чем в феврале.

В мае температура основной массы воды, поступающей в водохранилище, была равна 10.5° . Такие же ее значения отмечались и в водозаборном канале ТЭС. В отводной канал вода поступала с температурой 20° и практически с той же температурой сбрасывалась в залив водохранилища. Понижение температуры теплых вод ТЭС происходит в основном

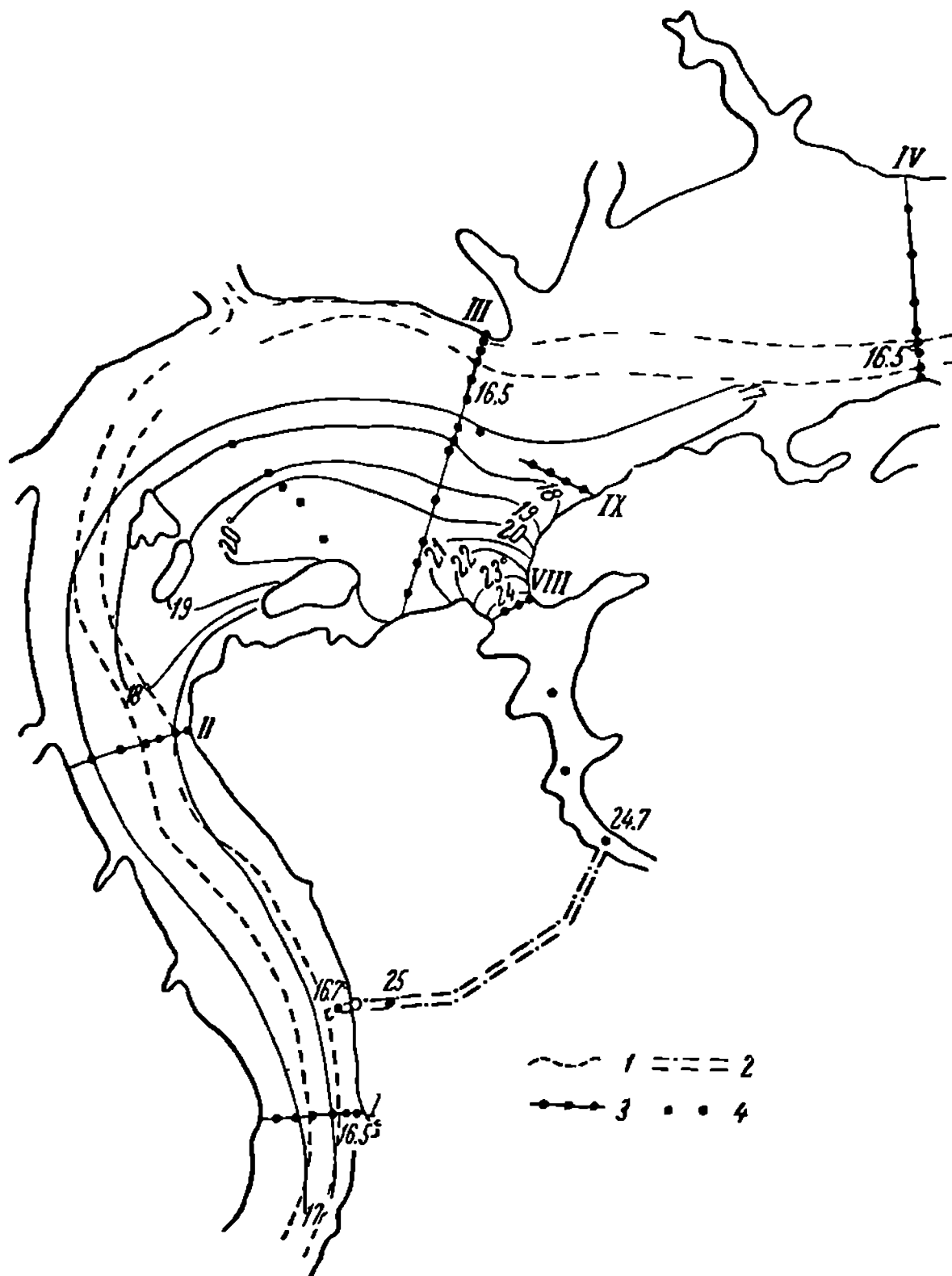


Рис. 70. Распространение теплых сбросных вод Конаковской ТЭС в Иваньковском водохранилище 31 мая 1967 г.

1 — русло Волги; 2 — водосбросной канал; 3 — гидрологические разрезы; 4 — гидрологические станции.

в результате смешения их с более холодными водами водохранилища. При высоком уровне водоема этот процесс наблюдался уже в Мошковском заливе, на выходе из которого температура воды в верхней половине потока ближе к правому берегу понизилась до $15.0-16.5^{\circ}$, а в придонной части — до 12° .

С выходом вод в водохранилище характер распределения их температур существенно отличается от зимнего. Ясно выраженного потока с повышенной температурой в толще вод не обнаруживается. Более теплые воды располагаются в поверхностном слое водохранилища и распреде-

ление их определяется прежде всего ветром. Так, в начале мая при устойчивом ветре юго-восточной четверти теплые воды залива были отнесены на мелководье к северному берегу водохранилища, а в конце мая—начале июня распространились вверх по водоему, придерживаясь русла, и прослеживались выше створа Конаковской ТЭС (рис. 70). Перемещаясь по направлению ветра, теплые воды в русловой части водохранилища частично вовлекаются в общий поток вод, направленный в сторону плотины, и повышают их температуру. Так, на расстоянии 14—15 км ниже залива температура воды в русловой части водоема в начале мая 1967 г. была примерно на 1° выше, чем в районе водозабора.

Таким образом, если до сооружения Конаковской ТЭС температура воды по течению ее в Иваньковском водохранилище весной постепенно понижалась, то в настоящее время в районе поступления подогретых вод Конаковской ТЭС она повышается в среднем на 1.5—2.0, а на более удаленных участках — на 1.0—1.5. С увеличением мощности Конаковской ТЭС влияние подогретых вод на температуру водной толщи водохранилища будет усиливаться и со временем распространится на большую часть водоема.

Существенных различий в температуре вод отдельных участков Угличского водохранилища не наблюдается благодаря его хорошей проточности. Для весенне-летнего периода характерно интенсивное повышение температуры воды от 4—6 до 18—20. Температура поверхностного слоя воды в водохранилище по направлению к плотине обычно имеет тенденцию к повышению. Исключение составляет лишь район г. Калязина, где иногда наблюдается резкое понижение температуры воды. В. И. Рутковский объясняет это явление ветровым перемешиванием. Однако, отмечая, что понижение температуры воды у г. Калязина происходит почти по всему поперечному сечению водоема, он не увидел заметного перекоса изотерм, указывающего на отсутствие сильных сгонно-нагонных течений, которые действительно не получают развития в Угличском водохранилище. Следовательно, рассматривать понижение температуры воды в этом районе как результат ветрового перемешивания нет достаточных оснований.

С нашей точки зрения, понижение температуры в районе г. Калязина, особенно в поверхностных слоях, происходит в результате усиления турбулентного обмена на этом участке в связи с увеличением скоростей стокового течения. Последнее связано с морфометрическими особенностями данного участка водохранилища, представляющего собой глубокую излучину со сбойным течением, которое захватывает не только русло Волги, но и пойменные участки. Из табл. 44 видно, что даже среднесуточная скорость течения у г. Калязина на правом склоне русла Волги равнялась 0.11 м/сек., а на левой пойме — 0.14 м/сек.

Распределение температуры воды по длине Иваньковского и Угличского водохранилищ, зафиксированное съемкой 14—15 июня 1961 г., показано на рис. 71.

Во время этой съемки температура воды на речном участке водоема была выше, чем на приплотинном, и в районе г. Калинина составила около 23. Практически такой же она оставалась в районе г. Калинина — у дер. Единоново. Резкое изменение температуры на участке между дер. Единоново и пос. Свердлово, где изотермы принимают почти вертикальное положение, свидетельствует о том, что там происходит медленное смешение теплых вод, поступающих в это время из речных участков водохранилища, с холодными водами, накопленными в водоеме в предшествующий период (Рутковский, 1963а).

От пос. Свердлово до г. Конакова температура воды продолжала понижаться. Достигнув минимальных для всего водохранилища значений

в районе г. Конаково, она вновь повышалась. Прогрен захватил всю водную толщу и даже в самых глубоких местах водохранилища температура воды ниже 15 была зафиксирована в единичных случаях (Рутковский, 1964). Положение изотерм на рис. 71 указывает на температурное расслоение водной толщи приплотинного участка.

В период интенсивного прогрева вод Угличского водохранилища наблюдается температурное расслоение водной толщи на отдельных участках. Так, на траверсе устья Нерли разность между температурой поверхностного и придонного слоев воды в июне 1961 г. достигала почти 6 (Рутков-

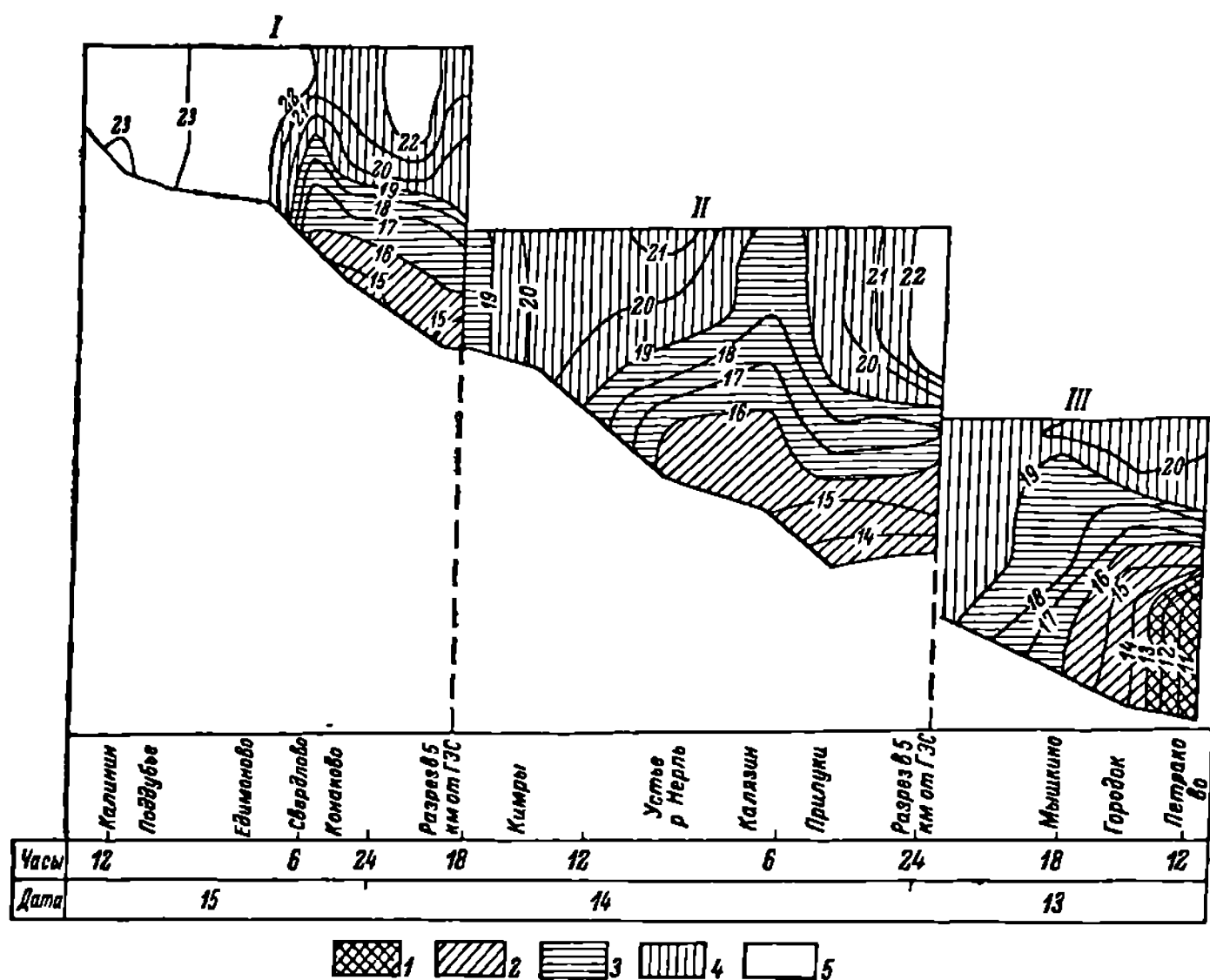


Рис. 71. Продольный температурный разрез Иваньковского (I) и Угличского (II) водохранилищ и волжского плеса Рыбинского водохранилища (III) 13—15 июня 1961 г. (по В. И. Рутковскому, 1964).

1 — от 10 до 13°; 2 — от 13 до 16°; 3 — от 16 до 19°; 4 — от 19 до 21°; 5 — от 21 до 24°.

ский, 1964). Различие в температуре поверхностных и придонных вод сохранялось и в приплотинной части этого водоема. Но температурное расслоение вод в Угличском водохранилище — явление кратковременное и неустойчивое.

Интересно отметить, что в июне 1961 г. из Иваньковского водохранилища в Угличское сбрасывались воды с температурой 18.4, то есть почти на 5° холоднее поступающих в него. Расчеты В. И. Рутковского показали, что температура воды в нижнем бьефе Иваньковской ГЭС ниже средней температуры поперечного сечения в верхнем бьефе на 2.5°. Значит, из Иваньковского водохранилища вследствие особенностей расположения входных отверстий водоводов ГЭС поступают в Угличское преимущественно воды придонных слоев руслового участка.

Из Угличского водохранилища в Рыбинское, наоборот, сбрасывается водная масса с температурой на 1.2° выше поступающей в него из Иваньковского водохранилища. Объяснение этому кроется в расположении водоводов турбин Иваньковской и Угличской ГЭС, в результате чего

из Иваньковского водохранилища в Угличское сбрасывалась вода с температурой на 5° ниже поступающей в него из Волги, а из Угличского водохранилища в Рыбинское — выше на 1.3° поступающей из Иваньковского водохранилища. Следовательно, в Иваньковском водохранилище принос тепла весной превышает вынос его в Угличское водохранилище, а в последнем, наоборот, поступление тепла меньше выноса в Рыбинское водохранилище.

Таким образом, В. И. Рутковский (1964) показал, что особенности температурного режима водохранилищ, расположенных в волжском каскаде, зависят не только от физико-географических условий, морфометрии, скоростного режима того или иного водоема, но и от технических характеристик ГЭС.



Рис. 72. Распределение температуры в поверхностном (а) и придонном (б) слое Рыбинского водохранилища 8 июня 1961 г.

Температурный режим Рыбинского водохранилища в значительной мере определяется морфологическими и гидрологическими особенностями водоема. Весеннее повышение температуры воды в нем начинается еще подо льдом. Установление положительных температур воздуха во второй половине марта, а в некоторые годы в начале апреля сопровождается снеготаянием на бассейне и акватории водоема, увеличением притока талых вод, разрушением ледяного покрова и повышением температуры воды водохранилища. Наиболее раннее вскрытие водохранилища происходит между 18 и 29 апреля, а наиболее позднее — между 28 апреля и 8 мая. Отдельные районы водоема очищаются ото льда неодновременно: сначала лед разрушается на речных участках, а затем в центральной части. Очищение водохранилища ото льда обычно заканчивается в первой половине мая.

Из-за неодновременного вскрытия и очищения водохранилища ото льда прогрев его вод весной идет неравномерно. Так, весной 1959 г. (в начале мая) температура воды у кромки льда равнялась 1.3—1.7°, а на свободных ото льда участках речных плесов достигала 9—10°. Различия в температуре воды по акватории водоема сохраняются длительное время и после полного его очищения. В этот период наиболее теплые паводочные воды заполняют подпертые речные участки крупных и малых рек. По мере продвижения их к центру водохранилища температура воды

быстро снижается. Центральная часть водоема ранней весной занята холодными зимними водами, температура которых в несколько раз ниже температуры воды речных потоков. Здесь в местах таяния последнего льда наблюдается минимальная температура воды. Характерное для весны распределение температуры воды в Рыбинском водохранилище для поверхностных и придонных слоев воды представлено на рис. 72.

Весной при смешении теплых паводочных и холодных зимних вод создаются зоны высоких горизонтальных и вертикальных температурных

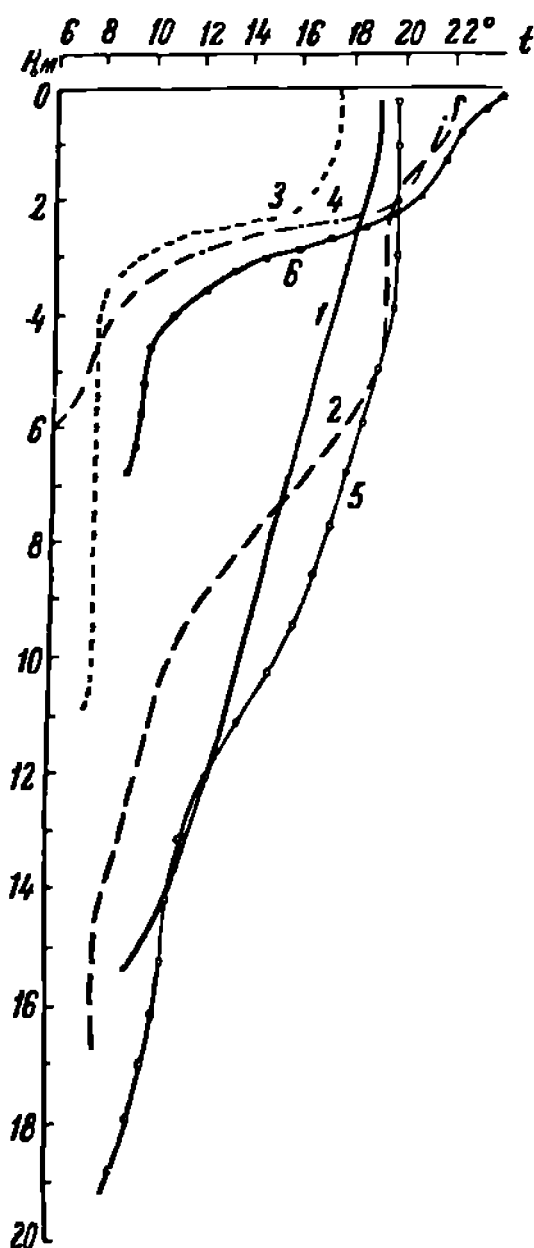


Рис. 73. Вертикальное распределение температуры в Рыбинском водохранилище 8 июня 1961 г.

1 — ст. 2; 2 — ст. 7; 3 — ст. 14; 4 — ст. 34; 5 — ст. 6; 6 — ст. 10.

градиентов. Так, в середине мая 1961 г. разность температуры в поверхностном слое и у дна достигала 4.5. Вертикальный градиент составлял 1.1 на 1 м, а горизонтальный — около 1 на 1 км (Буторин и Курдина, 1965). В зависимости от условий погоды абсолютные значения температуры воды могут изменяться из года в год, но отмеченные особенности в распределении ее по площади и глубине водоема сохраняются (табл. 63).

В процессе прогрева водохранилища обычно возникает температурное расслоение водной толщи. Иногда стратификация бывает значительной. Так, С. Н. Тачалов (1959) отмечает, что за время с 1947 г. по 1958 г. разность температуры по вертикали в отдельных случаях достигала 15°, а градиент ее в слое скачка составлял 7 на 1 м глубины.

Материалы синхронной съемки, выполненной нами 8 июня 1961 г., показали, что при определенных метеорологических условиях температурное расслоение вод отчетливо прослеживается по всему водохранилищу, причем характер и степень расслоения для отдельных участков водоема различны. Можно выделить несколько характерных кривых термического расслоения водной массы, показанных на рис. 73. Для большинства станций по бывшим руслам Волги, Мологи и Шексны отмечается плавное падение температуры воды с глубиной (рис. 73, кривая 1). Слой температурного скачка на таких

участках отсутствует или выражен очень слабо. С приближением к центральной части водохранилища расслоение водной толщи усиливается и слой температурного скачка намечается более отчетливо (рис. 73, кривые 2, 3, 4). В центральной части водохранилища разность между температурой воды на поверхности и у дна достигает максимальных значений (10°, а в отдельных случаях более 15°).

Степень стратификации вод на некоторых участках водохранилища в это время характеризуется температурными градиентами, рассчитанными для всей толщи воды (рис. 74). Наибольшие значения градиентов отмечаются на востоке центральной части водохранилища, где отчетливо прослеживается слой скачка. Так, на ст. 10 температурный градиент в слое скачка составлял 4.1, на ст. 14 — 6.7, а на станциях 15 и 34 — 8.6. Наиболее резкое изменение температуры на всех этих вертикалях

Температура воды на участках Рыбинского водохранилища

Сезон	Дата	Волжский, ст. 2		Моложский, ст 38		Шекснинский, ст. 23		Центральная часть			
		поверхность		дно		поверхность		ст. 10		ст. 34	
		поверхность	дно	поверхность	дно	поверхность	дно	поверхность	дно	поверхность	дно
Весна	9 V 1960	7.9	7.6	9.1	8.4	8.0	8.0	4.3	4.0	3.4	3.2
	12 V 1961	8.6	8.4	9.2	7.1	6.6	2.2	2.6	2.5	2.2	2.3
	12 V 1962	9.2	8.9	9.2	10.0	8.6	8.8	6.0	5.4	7.6	5.3
	15 V 1964	8.6	8.5	12.2	12.3	10.8	10.9	6.4	4.2	5.4	5.4
Лето	25 VII 1960	24.0	19.9	23.5	22.8	23.2	23.0	23.7	22.9	23.4	21.4
	3 VIII 1961	21.4	19.7	20.9	19.8	21.0	21.0	21.4	20.0	21.5	19.8
	6 VIII 1962	17.6	16.4	16.4	19.2	16.8	16.8	18.2	16.4	20.0	18.6
	3 VIII 1963	21.6	20.9	21.7	20.2	21.6	21.2	21.6	20.8	22.4	20.0
	1 VIII 1964	20.0	19.2	19.2	19.2	19.2	19.2	19.5	19.3	20.0	19.6
Осень.	4 X 1960	10.1	9.9	8.6	8.6	8.5	8.4	9.5	9.3	9.4	9.4
	10 X 1961	10.2	9.9	9.4	9.5	9.9	9.9	10.0	9.9	9.9	9.9
	3 XI 1962	5.4	5.3	3.8	3.8	3.2	3.3	4.3	4.1	4.3	4.4
	21 XI 1963	1.4	1.5	0.8	1.1	—	4.8	0.9	1.0	5.2	5.3
	3 XI 1964	6.2	6.2	5.6	5.5	4.8	4.8	4.7	4.7		
Зима	17—24 III 1961	0.0	0.4	0.0	4.2	0.0	1.1	0.0	1.1	0.0	2.9
	28 III—6 IV 1962	0.0	0.2	0.0	0.3	0.0	1.1	0.0	1.2	0.0	1.7
	30 I 1963	—	—	0.1	0.8	0.7	1.1	0.0	0.8		
	25 II—3 III 1964	0.0	0.2	0.1	0.8	0.2	1.0	0.1	1.6		

наблюдается в слое между 2-м и 3-м метрами (Буторин, 1962). Характер распределения температуры воды по поперечному сечению водоема во время данной съемки представлен на рис. 75.

Процесс возникновения слоя температурного скачка и его динамика в открытой части Рыбинского водохранилища прослежены К. К. Эдельштейном (1963) на примере многосуточной станции в районе Бабинских

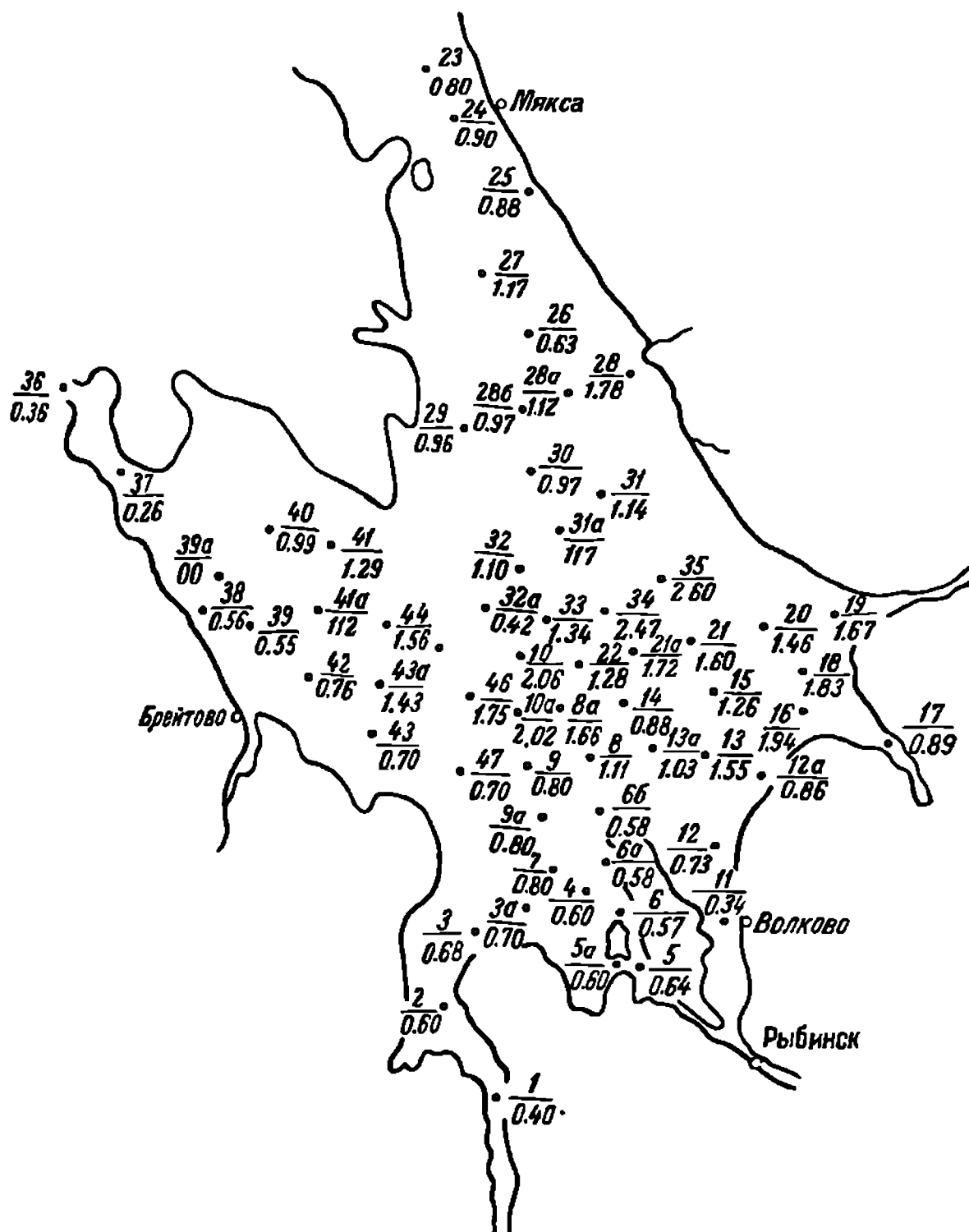


Рис. 74. Градиенты температуры воды (знаменатель) на станциях (числитель) в Рыбинском водохранилище 8 июня 1961 г.

островов. В начале июня 1961 г. в этом районе наблюдалось хорошо выраженное расслоение вод. Между эпилимнионом и гиполимнионом четко прослеживался слой скачка (рис. 76, см. вкл. стр. 144—145). Нижняя граница этого слоя на протяжении всего периода наблюдений была выражена весьма резко вследствие постоянной однородности вод гиполимниона. Верхняя граница слоя скачка определялась только при усилении ветрового перемешивания вод эпилимниона. Основные характеристики слоя скачка приведены в табл. 64.

Металимнион образовался в результате интенсивного прогрева поверхностного слоя воды как в предшествующие дни, так и в период наблюдений, а также вследствие кратковременного усиления ветра, вызвавшего частичное перемешивание вод по глубине. В дальнейшем под дей-

Термические характеристики водной массы на пойме Шекены к западу от Бабинских островов в 1961 г.
(по К. К. Эдельштейну, 1963б)

Дата	Время наблюдений, час. мин.	Средняя температура на вертикали, °С	Средняя температура эпи- и металимниона, С	Средняя температура гиполимниона, С	Глубина нижней границы слоя скачка, м	Мощность слоя скачка, м	Температурный градиент в слое скачка град м	Устойчивость слоя скачка, 10 ⁻³ г см ³
3 VI	4 15	9.4	12.8	6.4	5.7	1.0	6.5	631
	11 45	9.5	12.8	6.5	5.7	1.0	5.0	443
	16 30	10.0	13.4	6.6	6.0	1.0	5.0	389
	20 00	9.7	12.8	6.6	6.0	2.0	3.6	324
	24 00	9.1	12.2	6.6	5.3	2.0	3.5	318
4 VI	6 50	9.6	12.7	6.5	6.0	0.5	13.6	1220
	10 00	9.9	13.3	6.5	6.0	1.0	6.8	598
	14 00	10.8	13.6	6.6	7.2	1.0	6.4	596
	16 20	10.3	14.4	6.6	5.7	0.2	31.0	2800
	23 15	10.5	13.8	6.6	6.5	1.0	6.9	610
5 VI	8 15	10.4	13.9	6.6	6.2	1.0	6.8	610
	12 15	10.5	13.8	6.6	6.5	1.0	6.6	640
	16 10	11.1	14.3	6.7	6.3	1.0	7.0	676
	20 40	11.1	14.9	6.8	6.3	0.5	14.2	1392
	23 45	11.2	14.4	6.7	7.0	1.0	6.0	525
6 VI	7 45	11.3	14.5	6.8	7.0	1.5	5.1	476
	12 00	11.3	14.2	6.8	7.3	1.5	4.4	427
	16 00	11.8	15.0	6.8	7.3	1.0	6.4	596
	20 00	12.1	15.2	6.8	7.6	1.0	4.5	352
	23 45	12.1	14.7	6.8	8.0	2.0	3.5	338
7 VI	4 20	11.4	14.1	6.8	7.8	2.5	3.0	286
	8 30	11.6	14.8	6.8	7.2	1.0	6.0	551
	10 00	11.5	14.9	6.9	7.0	0.5	10.4	936

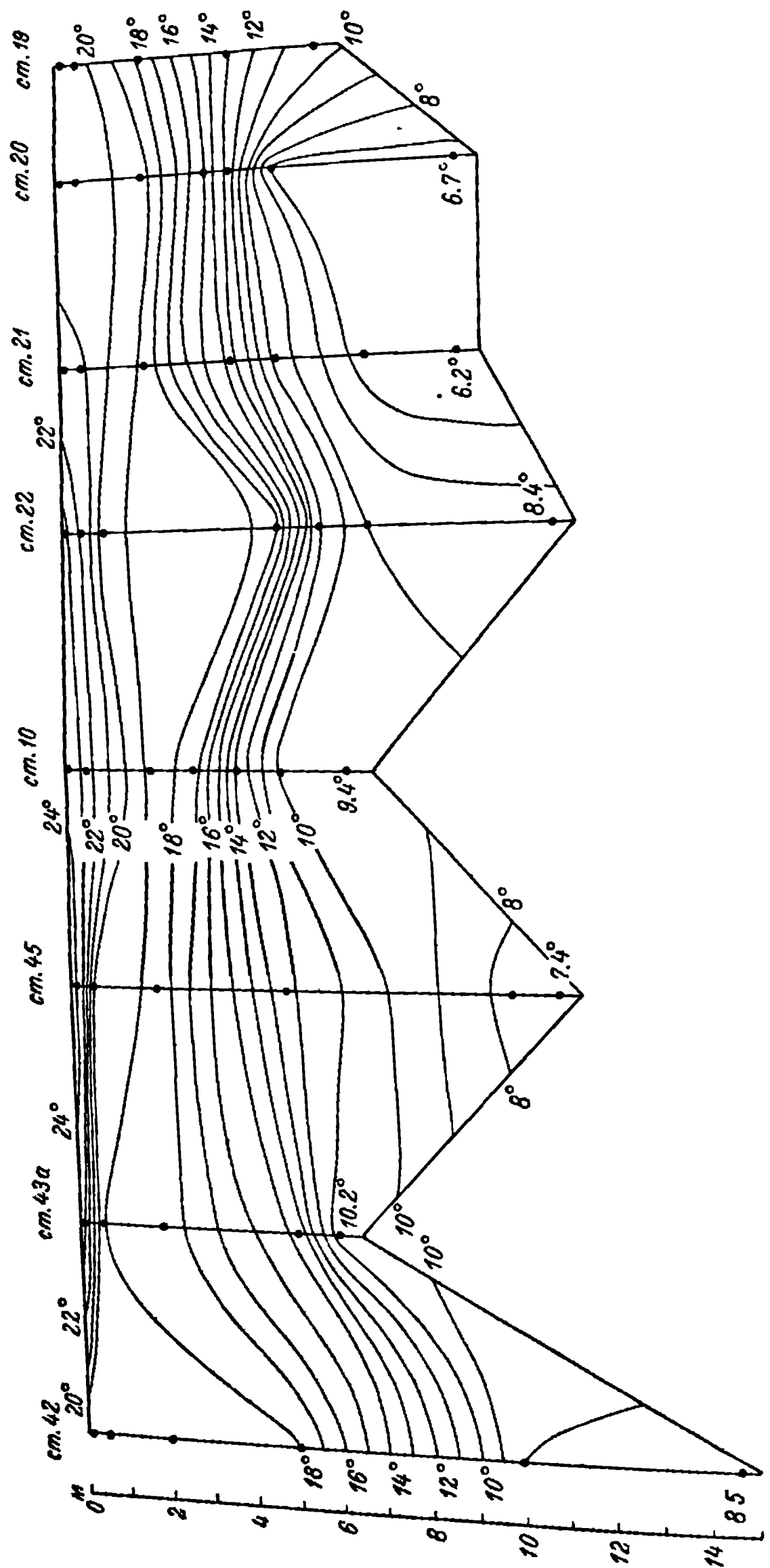


Рис. 75. Распределение температуры в глубоководной части Рыбинского водохранилища по разрезу пос. Брейтово дер. Колобово 8 июня 1961 г.

ствием продолжающегося прогрева, ветровых течений и перемешивания вод эпилимниона происходило изменение глубины залегания слоя скачка. Именно «подвижность эпилимнионных вод явилась причиной значительной динамичности слоя скачка, которая проявлялась в кратковременных его подъемах и погружениях с амплитудой до 1.5—2.0 м, колебаниях мощности слоя от 0.2 до 2.5 м и связанных с ними резкими изменениями градиента плотности вод внутри слоя» (Эдельштейн, 1963, стр. 256).

Температурное расслоение вод водохранилища, как правило, явление непродолжительное. При обширной акватории водоема оно нарушается ветром. Ветровое перемешивание, нарушающее стратификацию, способствует быстрому перераспределению тепла по глубине, и к концу весны вся масса вод водохранилища прогревается примерно до 15—20°.

В начале лета температуры поверхностного и придонного слоев близки друг к другу. Если температура верхнего 2-метрового слоя воды в летний период колеблется в пределах от 20 до 23°, то на придонных горизонтах она изменяется от 18 до 22°. Максимальные значения отмечаются на речных участках вблизи мелководий и на мелководьях междуречья. Время наступления максимальных температур в водоеме колеблется от конца июня до первой половины августа, а значения их на поверхности составляют 21—27°.

Во второй половине августа начинается интенсивное охлаждение водоема. Понижение температуры происходит довольно равномерно по всей толще воды. В среднем падение температуры в поверхностном слое составляет за сутки 0.2°, в отдельных случаях достигает 0.5° (Рутковский, 1963). За первые два осенних месяца температура воды в водохранилище снижается в среднем от 16—17° до 3—5°. В горизонтальном распределении температуры в начале осени наблюдается гомотермия, но в это же время намечается некоторое понижение ее к речным участкам Шексны, Мологи и малых рек. В дальнейшем в результате выхолаживания мелководий горизонтальная неоднородность температуры увеличивается. Температура воды центральной части водохранилища и волжского потока в конце осени на 1.0—2.5° выше, чем на остальных участках водоема.

Для характеристики температурных условий водохранилища в период замерзания нами выполнена специальная температурная съемка водоема в ноябре 1961 г. Этой съемке предшествовало резкое похолодание. Температура воздуха 7 ноября в районе Борка понизилась до —10°. К 13 ноября весь участок водохранилища от сел. Коприно до Шумаровского острова покрылся сплошным льдом толщиной 3—4 см. По данным Рыбинской гидрометеорологической обсерватории, замерзание водохранилища в эти дни на моложском участке началось у Первомайских островов, а на шекснинском — в районе бывшей дер. Ягорбы.

Наблюдения были начаты 13 ноября при температуре воздуха от —6° в центре водоема до —13° вблизи его берегов и производились при установившемся ледяном покрове или при блинчатом льде и сале. Севернее бывшего сел. Городка в шекснинской части водохранилища виднелась кромка льда.

Приведенные в табл. 65 данные показывают, что температура воды на отдельных участках водохранилища имела существенные различия. Наиболее низкие значения отмечались в районе Городка (ст. 22, 33). Средняя температура по вертикали на ст. 33 равнялась 0°, а на ст. 22 — 0.02°. Низкая температура воды в этом районе обусловлена прежде всего поступлением шекснинской воды, температура которой в этот период значительно ниже температуры воды водохранилища. Холодные воды Шексны, поступающие с севера, и обуславливают здесь более раннее понижение температуры. Низкие значения температуры отмечались также у Первомайских островов (ст. 38, 39) на моложском участке

Т а б л и ц а 65

Температура воды (°С) Рыбинского водохранилища
13—15 ноября 1961 г.

Глубина, м	Номера станций										
	2	3	6	7	10	13	14	15	21	22	33
0.5	0.50	2.80	2.80	1.80	1.60	3.20	3.10	3.20	2.20	0.02	0.0
2.0	1.15	—	2.76	—	1.60	—	3.10	3.24	2.30	0.02	0.0
5.0	2.95	2.63	2.82	1.80	1.60	—	—	—	2.50	0.03	0.0
10.0	3.35	2.72	2.80	2.23	—	—	—	—	—	—	—
15.0	—	—	2.80	—	—	—	—	—	—	—	—
Дно	3.78	3.70	2.85	2.90	1.80	3.22	3.42	3.22	2.50	0.03	0.10
Средняя тем- пература по верти- кали . .	2.93	2.84	2.63	2.15	1.62	3 22	3.14	3.21	2.44	0.02	0.00

Т а б л и ц а 65 (продолжение)

Глубина, м	Номера станций										
	34	35	38	39	40	41	42	43	45	46	47
0.5	2.40	1 30	0.80	0.50	2.21	1.92	1.80	3.30	1.71	2.00	1.70
2.0	2.40	1.30	0.91	0.51	2.36	2.00	1.71	3.30	1.77	1.97	1.72
5.0	2.40	1.40	1.70	1.30	2.38	2.00	1.82	3.40	1.80	1.99	1.81
10.0	—	—	1.88	1.73	—	—	2.50	—	—	—	2.66
15.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2.70
Дно	2.50	—	2.00	1.96	2.40	2.21	2.70	3.50	—	1.93	—
Средняя тем- пература по верти- кали . .	2.40	1.30	1.69	1.21	2.34	2.02	2.09	3.36	1.79	1.97	2.22

водоема. Средняя температура воды на ст. 38 была 1.69°, а на ст. 39 — 1.21°.

Кроме отмеченных двух районов, на большинстве выполненных стан- ций средняя температура воды превышала 2°. Так, в волжском плесе у сел. Коприно (ст. 2) при наличии ледяного покрова она равнялась 2.98°, а у Шумаровского острова (ст. 3) — 2.84°. В волжском плесе наблю- дался редкий случай ледостава при относительно высокой средней тем- пературе водной массы. Высокие значения температуры воды отмеча- лись и в центральной части водохранилища, в районе бывшего сел. Всехсвятского (ст. 13—15), а максимальные — у затопленного сел. Ле- онтьевского (ст. 43), где средняя температура по вертикали равнялась 3.36°. Общее представление о распределении средней температуры воды в водохранилище в период его замерзания дают изотермы на рис. 77.

В период ледостава наблюдается несколько типов распределения температуры воды по вертикали (рис. 78). На участках водохранилища, покрытых льдом, относительно низкая температура воды на поверхности постепенно повышается с глубиной и ко дну достигает максимальных зна- чений (рис. 78, а, б). Наибольшая равенность между температурой поверх- ностного и придонного слоев наблюдалась у сел. Коприно (3.28°). В от- крытой части водохранилища при отсутствии ледяного покрова проис- ходит выравнивание температуры по вертикали (рис. 78, в, г) и разность между ее значениями в поверхностном и придонном слоях, как правило, меньше 0.3°. Но и в данном случае температура в придонном слое воды

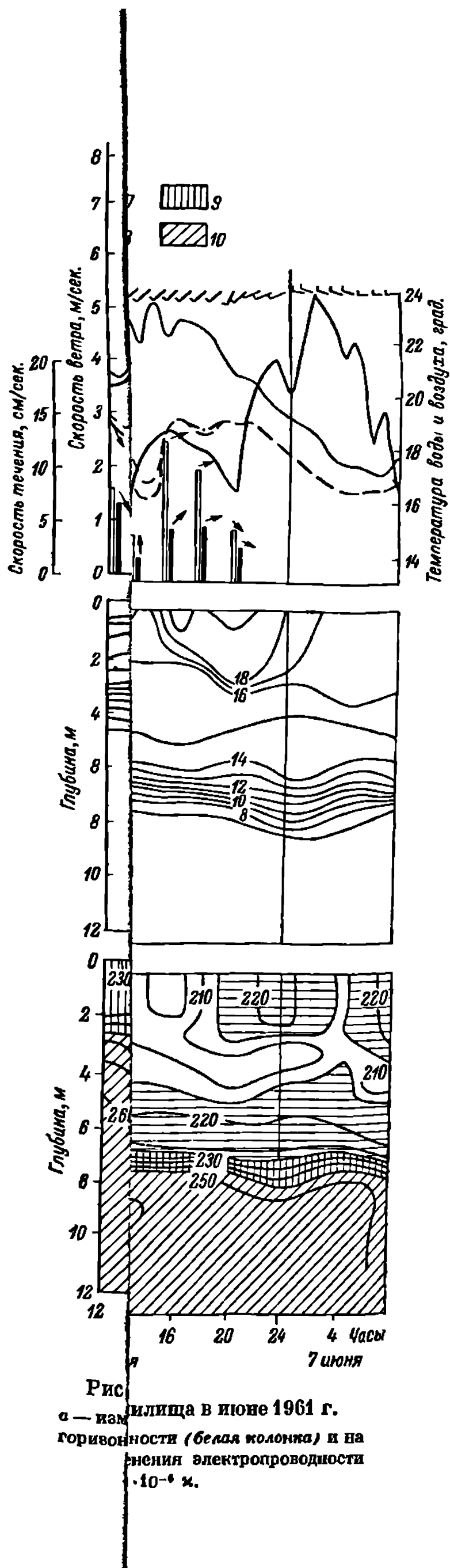


Рис. 1. Изменение температуры и электропроводности в Рыбинском водохранилище в июне 1961 г. а — на поверхности (белая колонка) и на глубине электропроводности $\cdot 10^{-4}$ м.

в районе
ок. отме-
замерза-
рии наб-
ературы.
на сере-
анилице
з речных
ниже 1 .
ышением
энинском

правило,
из года
а в при-
ие при-
истриро-

водохра-
юточных
т 1959 г.
ь от 0.7
до 0.3°.
на быв-
районах
м зоной
лй слой.
ды зимой
распре-
рис. 80.
Рыбин-
гемпера-
Это осо-

была выше, чем на поверхности. Только вблизи кромки льда в районе бывшего сел. Городка на глубинах 6—7 м и при ветре 5—6 м/сек. отмечалось полное перемешивание вод (рис. 78, д, е). Итак, в период замерзания Рыбинского водохранилища на большей части его акватории наблюдается хорошо выраженная обратная стратификация температуры.

После ледостана, окончание которого в среднем приходится на середину ноября, характер распределения температуры воды в водохранилище меняется. Наиболее низкая температура зимой наблюдается в речных потоках Волги, Мологи и Шексны, где она в течение всей зимы ниже 1°. С выходом этих потоков в открытую часть водохранилища и уменьшением скорости течения температура заметно повышается. Так, в шексинском

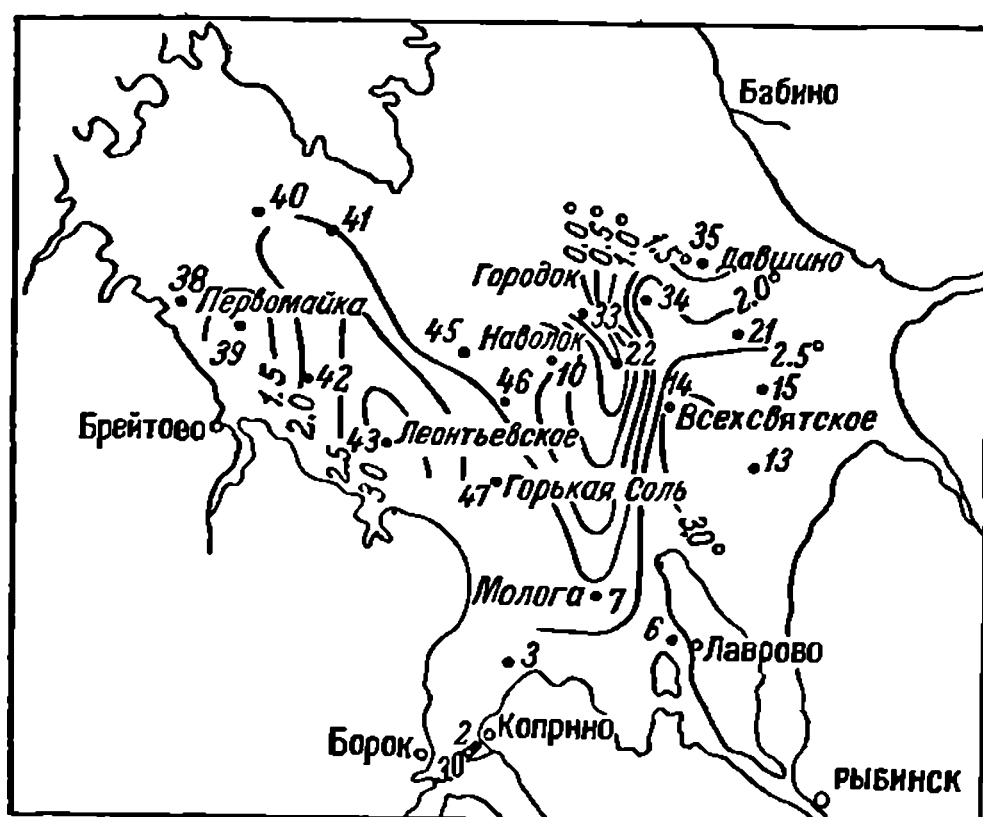


Рис. 77. Изотермы средней температуры воды в Рыбинском водохранилище 13—15 ноября 1961 г.

Цифрами обозначены номера станций.

потоке уже в районе дер. Вичелово и бывшей дер. Ягорба она, как правило, выше 1°. В центральной части водоема значения температуры из года в год резко меняются. Наиболее холодной была зима 1957 г., когда в придонном слое температуры практически не превышали 1°. Высокие придонные температуры на малопроточных участках (до 4.9°) зарегистрированы зимой 1959 г.

Общей закономерностью изменения температуры воды в водохранилище зимой является систематическое понижение ее на проточных участках и повышение на слабопроточных. Так, с февраля по март 1959 г. у бывшего г. Мологи температура в придонном слое понизилась от 0.7 до 0, а в моложском потоке у Первомайских островов — с 0.7 до 0.3. За то же время у Центрального мыса она повысилась с 0.6 до 2, а на бывшем русле Яны — с 3.7 до 4.9° (Бакастов, 1960, 1965). В этих районах устанавливается обратная температурная стратификация, причем зоной температурного скачка в большинстве случаев является придонный слой. Общее представление о характере распределения температуры воды зимой в центральной части водохранилища дают изотермы на рис. 79, а распределение придонных температур по акватории водоема показано на рис. 80.

Таким образом, даже краткий анализ температурных условий Рыбинского водохранилища обнаруживает их существенное отличие от температурных условий Иваньковского и Угличского водохранилищ. Это осо-

бенно четко проявляется в весенне-летний и зимний периоды. В Рыбинском водохранилище более четко, чем в Ивановском и Угличском, наблюдается пространственная и глубинная температурные дифференциации воды. Трансформация вод паводков происходит в нем в районе выхода речных потоков в озерную часть водоема. Даже тепляющее влияние речных вод половодья в Рыбинском водохранилище сказывается лишь в прпустевых участках, тогда как в Ивановском натекание прогретых речных вод на более холодные придонные воды приплотинного участка распространяются до плотины.

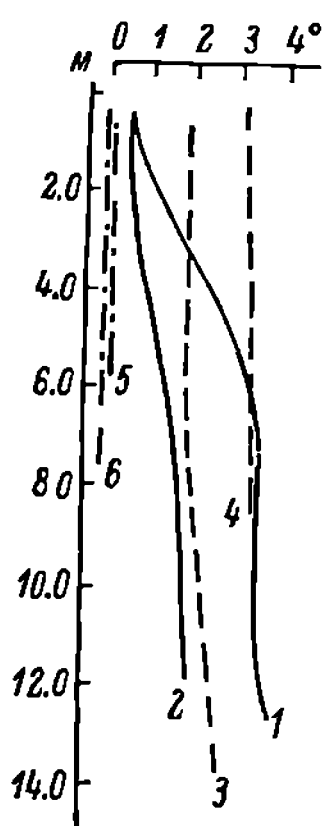


Рис. 78. Вертикальное распределение температуры в Рыбинском водохранилище 13 15 ноября 1961 г.

1 ст 2, 2 ст 39;
3 т 7, 4 ст 14;
3 - ст 22, 6 ст 33.

Температурный режим Горьковского водохранилища также имеет свои отличительные особенности. На примере этого водоема мы попытались проследить за теми изменениями, которые происходят в температуре воды реки при регулировании ее стока. Уже при заполнении Горьковского водохранилища температурный режим его вод существенно отличался от температурного режима Волги в естественных условиях. До создания плотины весь участок Волги от г. Рыбинска до г. Городца очищался ото льда 23 25 апреля. Температура воды Волги в районе г. Чкаловска обычно имела следующий годовой ход. После вскрытия реки она сначала медленно, а затем интенсивно повышалась и примерно через месяц после вскрытия достигала 15—16°. Максимум температуры (26—27°) наблюдался обычно в июле. Затем температура воды начинала падать и к концу октября понижалась до 3—4°, удерживаясь на этом уровне до осеннего ледохода. При ледоходе и ледоставе она снижалась до 0° на поверхности, сохраняя небольшие положительные значения в придонных слоях, в течение всего зимнего периода.

Температурный режим Горьковского водохранилища также имеет свои отличительные особенности. На примере этого водоема мы попытались проследить за теми изменениями, которые происходят в температуре воды реки при регулировании ее стока. Уже при заполнении Горьковского водохранилища температурный режим его вод существенно отличался от температурного режима Волги в естественных условиях. До создания плотины весь участок Волги от г. Рыбинска до г. Городца очищался ото льда 23 25 апреля. Температура воды Волги в районе г. Чкаловска обычно имела следующий годовой ход. После вскрытия реки она сначала медленно, а затем интенсивно повышалась и примерно через месяц после вскрытия достигала 15—16°. Максимум температуры (26—27°) наблюдался обычно в июле. Затем температура воды начинала падать и к концу октября понижалась до 3—4°, удерживаясь на этом уровне до осеннего ледохода. При ледоходе и ледоставе она снижалась до 0° на поверхности, сохраняя небольшие положительные значения в придонных слоях, в течение всего зимнего периода.

При ледоходе и ледоставе она снижалась до 0° на поверхности, сохраняя небольшие положительные значения в придонных слоях, в течение всего зимнего периода.

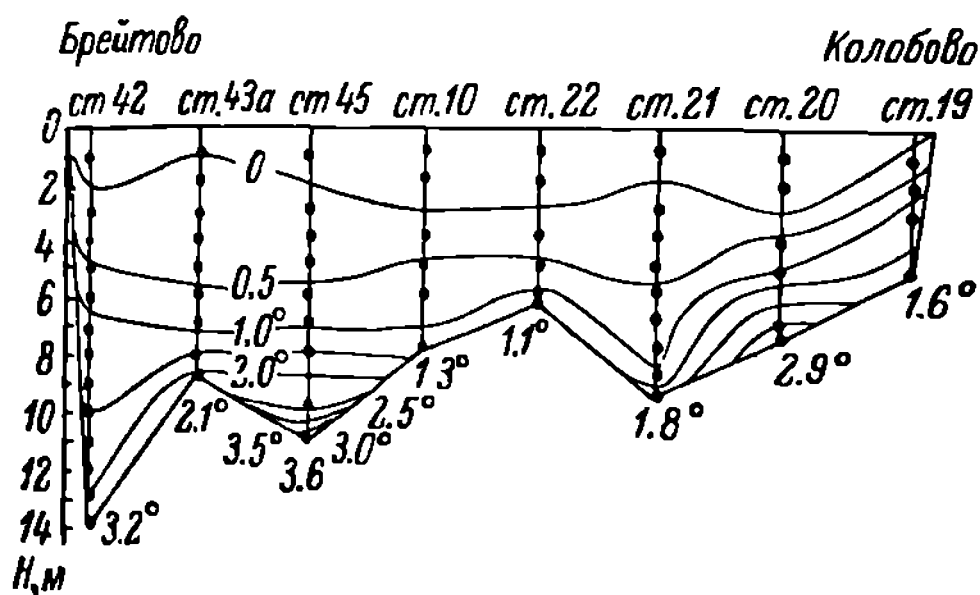


Рис. 79. Распределение температуры в глубоководной части Рыбинского водохранилища по разрезу пос. Брейтово дер. Колобово 25 29 декабря 1961 г.

Вскрытие приплотинного участка водохранилища в 1956 г. наблюдалось в последней декаде апреля, а ледоход начался 28 апреля. В 1957 г. ледоход у г. Чкаловска начался 26 апреля. Следовательно, вскрытие приплотинного участка водохранилища уже запаздывало по отношению к вскрытию реки. После очищения водоема ото льда температура воды

быстро повышалась и к третьей декаде мая 1956 г. на участке от г. Юрьевца до плотины достигала по всей глубине 11 12 в русловой части водохранилища и 14 15 на прибрежных участках. В 1957 г. в это же время тем-

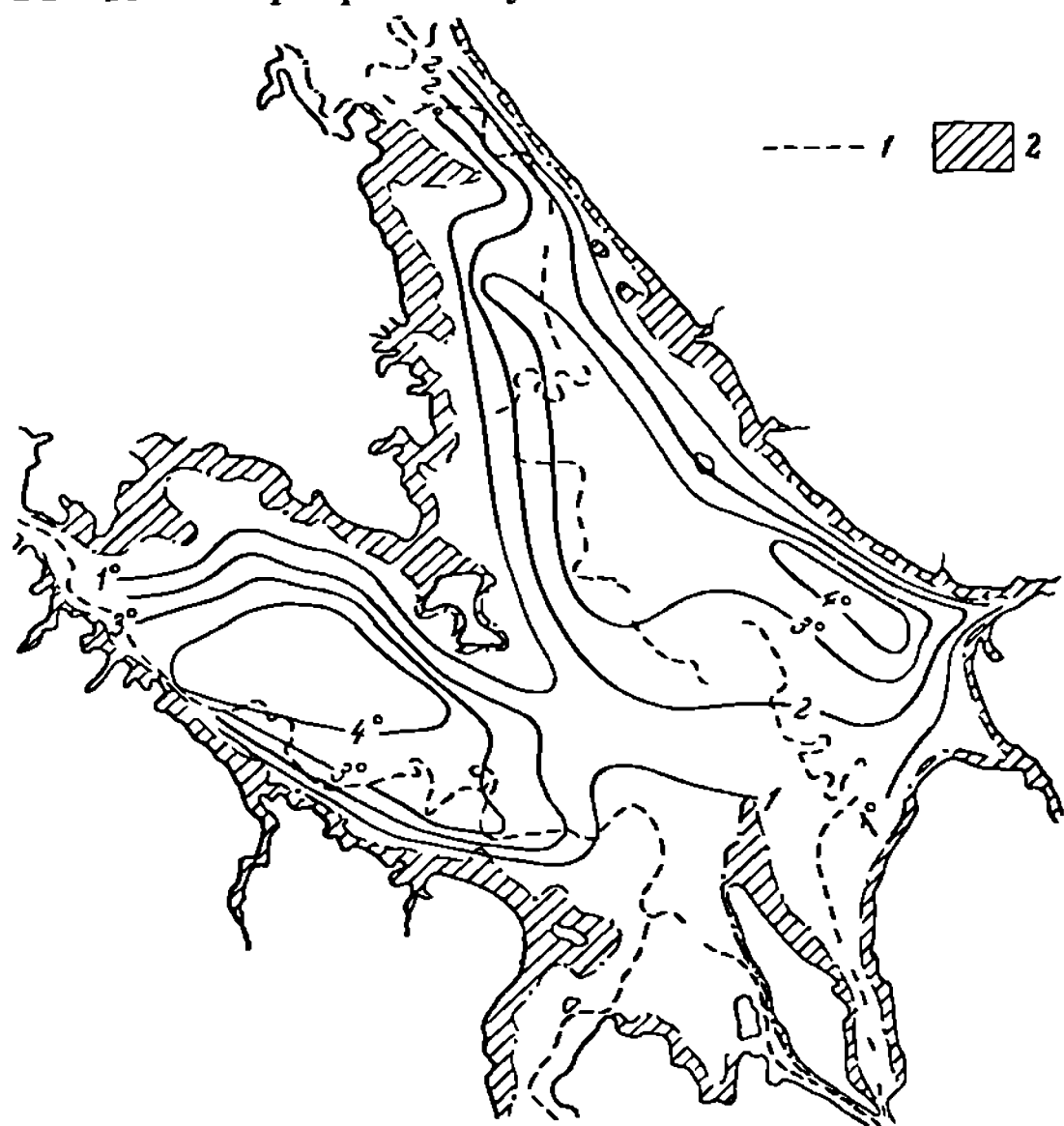


Рис. 80. Температура дна Рыбинского водохранилища в марте 1961 г. (по С. С. Бакастову, 1965).
1 — затопленные русла рек; 2 — осушаемая зона водохранилища.

пература в открытой части повысилась до 14—16° и в прибрежье до 16—18 . Прогрев отдельных участков водохранилища шел неравномерно. Так, 17 мая 1956 г. в районе г. Рыбинска температура воды на поверхности была 1.1—1.4°, а 20 мая у г. Пучежа она равнялась 11.2°.

На участке от г. Рыбинска до устья р. Елнати, где в какой-то степени сохранился скоростной режим реки, разница между температурой в поверхностном слое и у дна, как правило, была меньше 0.1°. Только в отдельных случаях она достигала нескольких десятых градуса. Ниже р. Елнати разница между температурой по верхнего и придонного слоев возрастала и колебалась от 0.6 ниже устья этой реки до 4.1° у г. Пучежа. Таким образом, уже в первый год наполнения водохранилища на его приплотинном участке наблюдалось температурное расслоение водной толщи, отчетливо выраженное как в прибрежье, так и в открытой части водоема, чего не происходит в реке.

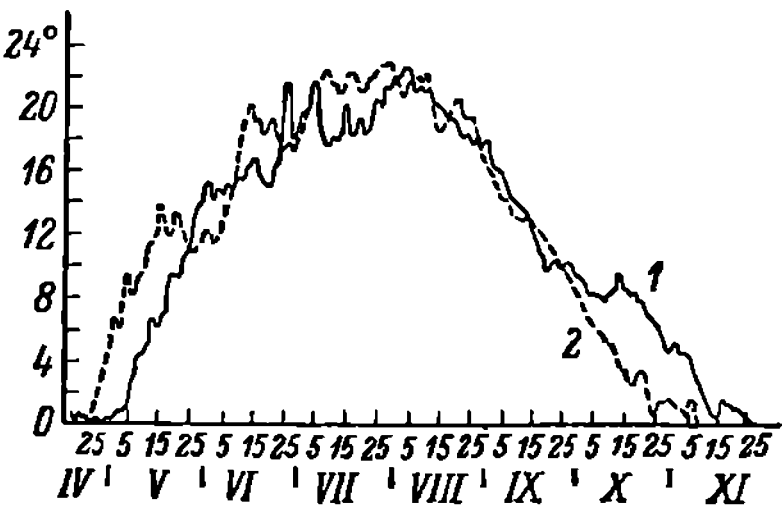


Рис. 81. Изменение температуры воды в Горьковском водохранилище в 1958 (1) и 1959 гг. (2) по данным чкаловского водопоста.

За температурными условиями в озерной части Горьковского водохранилища в безледный период можно проследить по ходу температур на чкаловском водомерном посту (рис. 81). Интенсивный прогрев водохранилища начинается одновременно с его наполнением. Основным источником поступления тепла в водоем, еще покрытый льдом, являются воды половодья, которые в это время имеют температуру на несколько градусов выше, чем воды водохранилища. При относительно высокой температуре речных вод и высокой проточности речная часть водохранилища очищается ото льда раньше озерной. Несмотря на это температура на при-

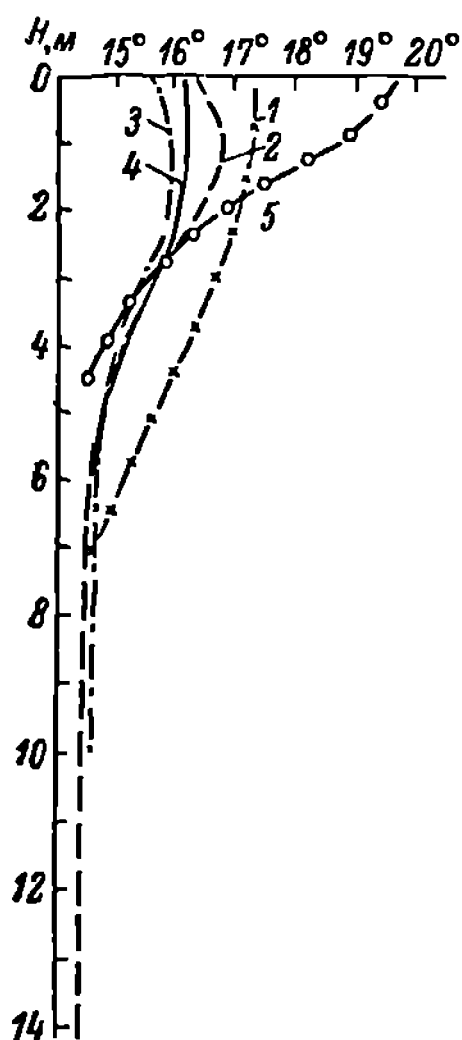


Рис. 82. Вертикальное распределение температуры в Горьковском водохранилище на чкаловском разрезе.

Номера у кривых соответствуют номерам станций.

плотинном участке Горьковского водохранилища в отличие от приплотинного участка Рыбинского весной на 8—10 выше, чем в речной части. Это объясняется тем, что в речную часть Горьковского водохранилища ранней весной сбрасываются холодные воды из Рыбинского водохранилища. Температура их обычно равняется примерно 3—4°. При относительно небольшом объеме Горьковского водохранилища в период весеннего наполнения его значительная часть зимних холодных вод в приплотинной части вытесняется и замещается водами половодья, поступающими от таких притоков, как Немда и Унжа. Естественно, что температура вод половодья, особенно во второй его фазе, значительно выше холодных вод Рыбинского водохранилища.

К концу весны распределение температуры воды по длине Горьковского водохранилища заметно меняется. Темп и характер весеннего прогрева вод определяется в основном условиями погоды. Если погода холодная и ветреная, прогрев вод водоема идет медленно. В жаркую и безветренную погоду уже в мае возникает температурная стратификация водной толщи с хорошо выраженным слоем скачка. При этом температура воды в поверхностном слое может достигать 20—25°. В период интенсивного прогрева незначительная температурная стратификация может быть и в речной части водохранилища. Здесь обычно разница между

температурой воды в поверхностном слое и у дна не превышает 1°, но уже в районе сел. Решмы, расположенного примерно в 20 км ниже г. Кинешмы, она достигает иногда 4°, а в наиболее глубокой части водоема — 8° и более (рис. 82).

В отличие от первой половины весны в конце ее температура воды на речном участке водохранилища выше, чем в приплотинной части, несмотря на то, что последняя расположена южнее. Это отмечалось нами (Буторин, 1963а) и В. И. Рутковским (1963б) на основании данных максимальных и минимальных значений температуры на участке водоема от г. Ярославля до плотины Горьковской ГЭС. Подобное распределение температуры объясняется следующими обстоятельствами. К концу весны воды Рыбинского водохранилища, составляющие основную часть притока Горьковского водохранилища, прогреты до 17—18°. Поступая в речную часть Горьковского водохранилища, они повышают свой теплозапас как за счет теплообмена с воздухом, так и за счет более теплых вод боковой проточности. Высокие скорости течения на речном участке водохра-

нилища обуславливают хорошее перемешивание вод и прогрев их протекает равномерно по всей толще. С приближением к озерной части водоема проточность уменьшается, а глубины увеличиваются. Появляется температурное расслоение вод, при котором, несмотря на интенсивный прогрев поверхностных слоев, придонные воды прогреваются слабо (см. рис. 82). Поскольку слой температурного скачка наблюдается обычно на глубине 4—5 м, то большая часть объема вод приплотинной части водоема остается слабо прогретой и за счет этого общая картина распределения температур оказывается в это время такой, как она описана выше.

Наблюдающееся ежегодно похолодание в конце мая—начале июня и сильные ветры приводят к выравниванию температуры по акватории и глубине водоема: в первом случае в результате понижения температуры поверхностных слоев, а во втором — в результате частичного или полного перемешивания вод. Вследствие этого продолжающийся прогрев вод летом происходит обычно при прямой температурной стратификации с разницей между поверхностными и придонными температурами в 1—3° и без четко выраженного слоя скачка. В это время наблюдается и выравнивание температуры поверхностного слоя воды по длине водохранилища. В отличие от весны температура поверхностного слоя воды в июле—августе по всей длине водохранилища довольно однородна и незначительно повышается по ходу ее к плотине Горьковской ГЭС. Общее зональное повышение температуры на протяжении Горьковского водохранилища в августе 1962 г. не превышало 1.5 (Буторин, Курдина, 1968). Максимальные значения температуры в водохранилище достигают 18—24° и наблюдаются в конце июля—начале августа.

В безледный период температура воды в водохранилище имеет суточный ход. Суточные колебания ее наиболее резки в поверхностном слое. Так, в 1956 г. амплитуда этих колебаний равнялась на приплотинном участке в поверхностном слое 0.9 в конце мая и 2.1 в начале августа, а у дна — 0.7 в мае и 0.2° в августе. Подобные же изменения температуры были отмечены нами в 1957 г. (Буторин, 1963а). Как указывает К. К. Эдельштейн (1968), в ясные штилевые дни июня—июля суточная амплитуда температуры поверхностных слоев воды в Горьковском водохранилище достигает 6.

Выхолаживание вод водохранилища начинается с середины августа (см. рис. 81) и продолжается до ледостава. Характерной особенностью этого периода является наблюдающаяся по всему водохранилищу гомотермия. Наиболее интенсивно процесс выхолаживания идет в прибрежье и на мелководных участках, где в середине октября температура воды на 2—3° ниже, чем в глубоководных районах. В выхолаживании водной массы, помимо отрицательного радиационного баланса, заметную роль играет теплообмен воды и воздуха.

Следует отметить, что ход температуры в Горьковском водохранилище на поверхности, свободной ото льда, в основном соответствует изменению температуры воздуха, но при меньшей амплитуде колебаний (рис. 83). Весной температура воды всегда ниже температуры воздуха, а начиная со второй половины июня, как правило, выше ее. Следовательно, в температурном режиме данного водоема проявляется та же закономерность, что и в температурном режиме рек умеренного пояса: температура воды в безледный период в среднем выше температуры воздуха (Буторин, 1959а).

С образованием ледяного покрова на водохранилище начинается зимний прогрев вод. На малопроточных участках температура придонного слоя воды постепенно возрастает и к февралю—началу марта достигает 1—2°. По данным Б. С. Бородкина и Б. К. Павлова (1962), максимальные придонные температуры воды в водохранилище равнялись у г. Чкаловска

0.28—0.31 , в аванпорту 1.4 2.2 и достигали 4.8 в промежуточном бьефе гидроузла. В отличие от теплозапаса Рыбинского водохранилища теплозапас Горьковского перед вскрытием уменьшается.

Особенности температурного режима Горьковского водохранилища полностью распространяются на Куйбышевское. Весеннее повышение температуры воды в этом водоеме также начинается задолго до вскрытия и происходит сначала очень медленно, так как значительная часть тепла от солнечной радиации расходуется на таяние льда. Все же к концу вскрытия и стаивания льда температура воды повышается до 5—7.

В период весеннего прогрева температура поверхностного слоя воды в прибрежной и открытой частях водохранилища имеет существенные различия. Как и в Горьковском водохранилище, в начале весны температура воды на глубоких проточных участках повышается быстрее, чем на пойменных непрогонных. Так, по данным П. И. Никулина, 28—30 апреля 1959 г. на разрезе выше г. Тетюшей в глубоководной проточной части водохранилища, где глубины достигают 35 м, температура воды поверх-

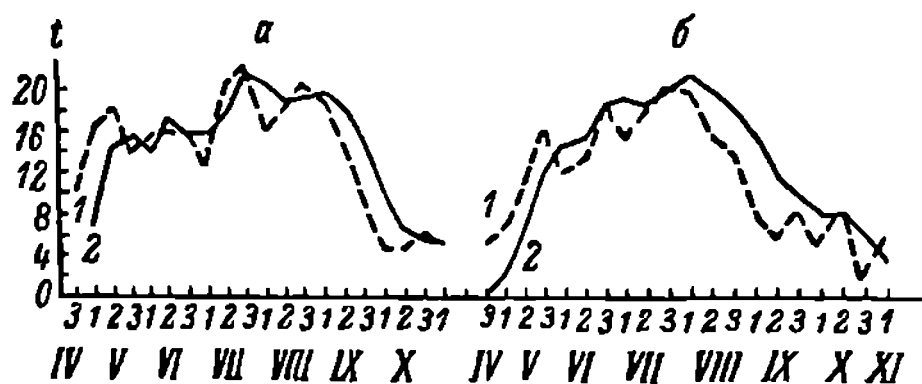


Рис. 83. Температура воды (1) и воздуха (2) за безледный период 1957 (а) и 1958 гг. (б).

ностного слоя равнялась 8.1 , а на пойменном участке с преобладающими глубинами 5—6 м она была лишь 3.8 (Боровкова и др., 1962).

При дальнейшем прогреве вод водохранилища повышение температуры в прибрежье и на мелководье идет значительно быстрее, чем на глубоководных участках, и картина меняется: температура воды в заливах и на мелководных участках становится выше, чем в открытой глубоководной части акватории водоема.

При большой протяженности водохранилища и неодинаковом широтном положении его отдельных участков в период интенсивного прогрева наблюдаются значительные различия в температуре воды по длине водоема. Как и в Горьковском водохранилище, температура воды поверхностного слоя на речном участке выше, чем на приплотинном. По данным В. И. Рутковского, в конце июня 1960 г. от нижнего бьефа Горьковской ГЭС до г. Верхний Услон температура воды систематически повышалась и в районе последнего достигала 23 . С уменьшением скорости течения и увеличением глубин в районе устья Камы началось интенсивное понижение температуры, которое прослеживалось до плотины Волжской ГЭС им. В. И. Ленина (Рутковский, 1963б). Аналогичная картина наблюдалась 13 июля 1959 г., когда по основному ходу судна на участке 95—130-й километр от плотины Волжской ГЭС поверхностная температура воды изменялась от 15.6 в нижней части участка до 19.5 в верхней части (Боровкова и др., 1962). Из табл. 66 видно, что даже среднемесячная температура поверхностного слоя воды в мае и в большинстве случаев в июне по ходу воды к плотине понижается. Следовательно, накопление тепла в воде весной в речных районах водохранилища происходит быстрее, чем в приплотинном. Таким образом, изменение температуры воды весной в поверхностном слое по длине Куйбышевского водохранилища про-

Таблица 66

Среднемесячная температура воды (°С) поверхностного слоя Куйбышевского водохранилища
(по П. И. Никулину, 1958)

Пункт	Год	V	VI	VII	VIII	IX	X
Г. Тольятти	1957	10.4	18.7	20.3	20.8	19.7	11.5
	1958	6.6	16.1	20.4	21.0	14.6	8.6
	1959	8.7	17.2	19.9	20.1	15.7	8.3
	1960	5.6	16.6	21.3	21.4	17.3	9.9
Г. Ульяновск	1957	12.8	18.1	20.3	20.6	19.9	9.8
	1958	7.4	17.0	20.5	21.4	13.1	8.2
	1959	10.5	17.0	22.1	20.4	14.6	6.9
	1960	8.2	17.9	21.9	20.9	15.8	9.5
Г. Лаишево	1957	13.5	18.7	20.9	21.1	18.6	6.0
	1958	9.8	17.5	20.9	20.8	11.0	5.8
	1959	11.0	17.5	22.1	19.2	12.4	4.0
	1960	9.4	19.3	22.4	19.8	14.6	5.6
Сел. Вязовые	1957	14.7	17.6	19.3	20.1	17.8	6.4
	1958	9.8	17.1	20.1	20.9	11.4	7.0
	1959	11.9	18.0	21.9	20.6	12.7	4.1
	1960	10.6	19.5	22.8	20.9	16.0	6.6

исходит так же, как и в Горьковском водохранилище, и обусловлено теми же причинами.

В период интенсивного прогрева в озеровидных расширениях водоема часто наблюдается четко выраженная прямая температурная стратификация. Разница между поверхностными и придонными температурами достигает 7.5° и более. Отчетливо выражена температурная стратификация наблюдалась нами даже в конце августа (Буторин, 1963б).

Летнее повышение температуры воды в Куйбышевском водохранилище происходит более медленно и плавно по сравнению с весной (рис. 84). Наибольший прогрев вод обычно отмечается в конце июля—начале августа. В это время максимальные температуры поверхностного слоя воды достигают 24—25°, а в отдельные годы — 27—28° (Боровкова и др., 1962).

Ветровое перемешивание вод в летний период вызывает резкие колебания температуры воды в поверхностном слое и способствует выравниванию температуры по глубине, особенно в районах мелководий, а также выравниванию температуры поверхностного слоя по длине водохранилища. По данным П. И. Никулина, разность температур в конце июля—начале августа на отдельных участках водохранилища не превышает 2—2.5°. Наши наблюдения показали, что температура поверхностного слоя воды от нижнего бьефа Горьковской ГЭС до зоны выклинивания подпора Куйбышевского водохранилища в это время колеблется в пределах 1—1.5° (Буторин, Курдина, 1968). В зоне распространения под-

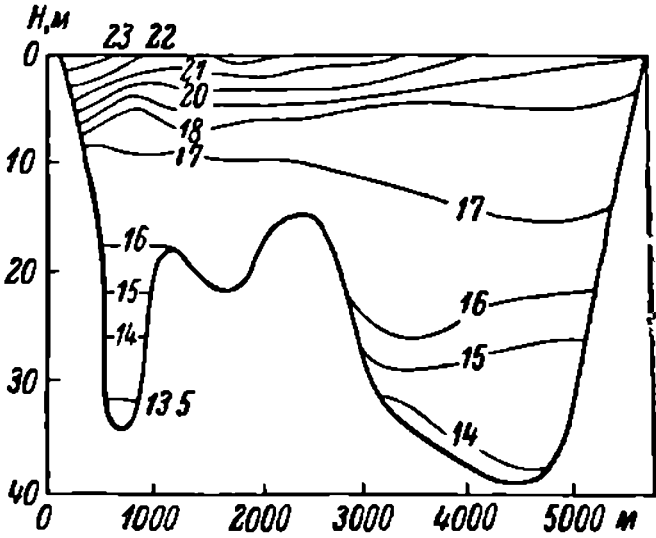


Рис. 84. Распределение температуры в глубоководной части Куйбышевского водохранилища на разрезе у г. Тольятти 4—5 июля 1959 г. (по П. И. Никулину, 1962).

пора она в отличие от весеннего периода систематически повышается по ходу воды, но колебания ее также невелики.

Примерно со второй половины августа начинается выхолаживание водохранилища. Протекает оно так же, как и в Горьковском водохранилище. Некоторые различия наблюдаются лишь в сроках завершения процесса. Обычно к середине ноября температура воды понижается до 1.5—1.0°. Как и в других водохранилищах волжского каскада, в Куйбышевском понижении температуры на речных участках идет значительно быстрее, чем на приплотинном. Следовательно, в распределении температуры по длине и акватории водоема в это время наблюдается картина, обратная весенней.

Зимнее распределение температур в Куйбышевском водохранилище не отличается от того, которое наблюдается в других водохранилищах подобного типа.

Общая картина изменения температуры воды в Волгоградском водохранилище полностью совпадает с таковой в Куйбышевском. Распределение ее по длине водоема в летне-осенний период довольно однородно. Основная масса вод, поступающих из Куйбышевского водохранилища, в начале июля имеет температуру порядка 19—21°. В сентябре температура этих вод ниже на 2—3° по сравнению с июлем. По ходу водной массы температура ее постепенно повышается и достигает максимальных значений в верхнем бьефе Волжской ГЭС им. XII съезда КПСС. Несмотря на различия в абсолютных значениях температуры воды, зависящих от особенностей погоды, тенденция к изменению ее по длине водохранилища из года в год сохраняется.

Значительные скорости течения на большей части водоема обуславливают хорошее перемешивание вод. При отсутствии ледяного покрова этому способствует и ветер. Однако это не означает, что величины температуры воды даже в течение одного сезона остаются постоянными. В зависимости от погоды и местных условий они могут меняться. Так, в период с 15 июля по 26 августа 1966 г. температура воды на приплотинном участке водохранилища колебалась от 18.2 до 27.4°. Почти повсеместно и во все сроки наблюдений в указанный период наблюдалась прямая температурная стратификация. На слабопроточных участках поймы в периоды интенсивного прогрева вод разность в температуре поверхностных и придонных слоев достигала 7—8°. Таким образом, и в Волгоградском водохранилище при высоком коэффициенте его водообмена даже в летний период наблюдается температурное расслоение водной толщи.

Краткий анализ температурных условий волжских водохранилищ указывает на то, что при зарегулировании стока реки эти условия существенно изменились. В естественных условиях в период открытого русла температура воды реки определялась температурой воздуха и по всей толще потока была близка к ней. Относительно высокая скорость течения и хорошее перемешивание вод обеспечивали медленное и равномерное повышение температуры в реке. Заметные изменения ее отмечались лишь ниже притоков с большим водосбором, главным образом весной и осенью, когда различие метеорологической обстановки по бассейну реки наиболее значительно.

Температурный режим водохранилищ резко отличается от температурного режима реки. Вскрытие водохранилищ происходит позднее, наблюдаются существенные различия в температуре воды отдельных участков водохранилищ, в зоне подпора отчетливо прослеживается температурная стратификация.

Особенности развития гидрологических процессов в годовом цикле

В результате неравномерного поступления солнечной энергии на земную поверхность в течение года происходит смена сезонов, которая сопровождается двумя основными процессами — весенне-летним прогревом воздуха, суши и воды и осенне-зимним их охлаждением. Ввиду того что вода прогревается и охлаждается медленнее, чем воздух и суша, а начало года 1 января — в наших широтах приходится на середину зимы, при годовой характеристике гидрологических процессов неудобно пользоваться календарными сроками сезонов. Поэтому при анализе годовых и сезонных изменений характеристик гидрологического режима обычно пользуются так называемым гидрологическим годом. Это позволяет исследовать гидрологические процессы в водоеме в их естественном развитии.

За начало гидрологического года некоторые исследователи принимают начало осеннего периода, когда происходит переход от более или менее устойчивого питания реки или водохранилища подземными водами к питанию преимущественно поверхностным стоком. Другие авторы определяют начало гидрологического года началом зимы, когда совершенно прекращается поверхностный сток и осадки накапливаются в виде снега. Для района наших исследований это примерно середина ноября.

Естественно, что начало гидрологического года в обоих случаях в различные годы приходится на разные календарные даты, которые, как правило, не совпадают с началом отдельных месяцев. Однако для удобства обработки гидрологических материалов его условно принимают во все годы одинаковым и относят к первому числу того или иного месяца.

Гидрологический год, как и календарный, подразделяется на сезоны, которые существенно отличаются от календарных и климатических по фазам развития процессов и по своей продолжительности. При выделении гидрологических сезонов отдельные авторы используют различные показатели. Так, при исследовании внутригодового распределения стока Г. В. Казанцев (1936), П. С. Кузин (1936), Б. Д. Зайков (1938, 1944, 1946) и Л. К. Давыдов (1953) использовали годовые гидрографы и анализировали их вместе с некоторыми гидрологическими и метеорологическими характеристиками. В отличие от них Л. Л. Россолимо (1929), И. В. Молчанов (1945, 1946), С. Г. Лепнева (1950) и Б. Б. Богословский (1951, 1960) выделяли сезоны по направлению процессов теплообмена или по величине и изменению теплозапаса, а также по характеру вертикального распределения температуры воды.

Учитывая особенности водохранилищ как водоемов с искусственным регулированием притока и сброса воды, для выделения гидрологических сезонов в этих водоемах наиболее целесообразно использовать комплекс гидрологических показателей режима и прежде всего уровень и температуру воды. Первый фактор является показателем изменения объема водной массы в водохранилище, а второй определяет величину теплозапаса в нем. Уровень и температура воды характеризуют развитие и сезонную изменчивость основных гидрологических процессов в водохранилищах, определяющихся главным образом поступлением количества солнечной энергии на поверхность земли.

Выделение гидрологических сезонов для района исследований с характеристикой гидрологических процессов в отдельные сезоны выполнено нами на примере Рыбинского водохранилища (Буторин, Курдина, 1965). Естественно, что сроки наступления и продолжительность сезонов у отдельных водохранилищ различны, но характер и направленность гидрологических процессов по сезонам у всей рассматриваемой системы водо-

хранилищ во многом сходны. Это хорошо подтверждается материалами, изложенными в предшествующих разделах настоящей главы, и дает основание распространить принцип выделения гидрологических сезонов, принятый нами для Рыбинского водохранилища, на другие водохранилища каскада.

Анализируя годовой ход уровня и температуры воды водохранилищ, нетрудно установить, что колебание величин обоих элементов в течение года весьма значительно (рис. 85). Наиболее четко на уровне и температурной кривых выделяется гидрологическая весна. За начало ее мы принимаем период устойчивого повышения уровня и температуры воды в водохранилище. Установление положительных температур воздуха

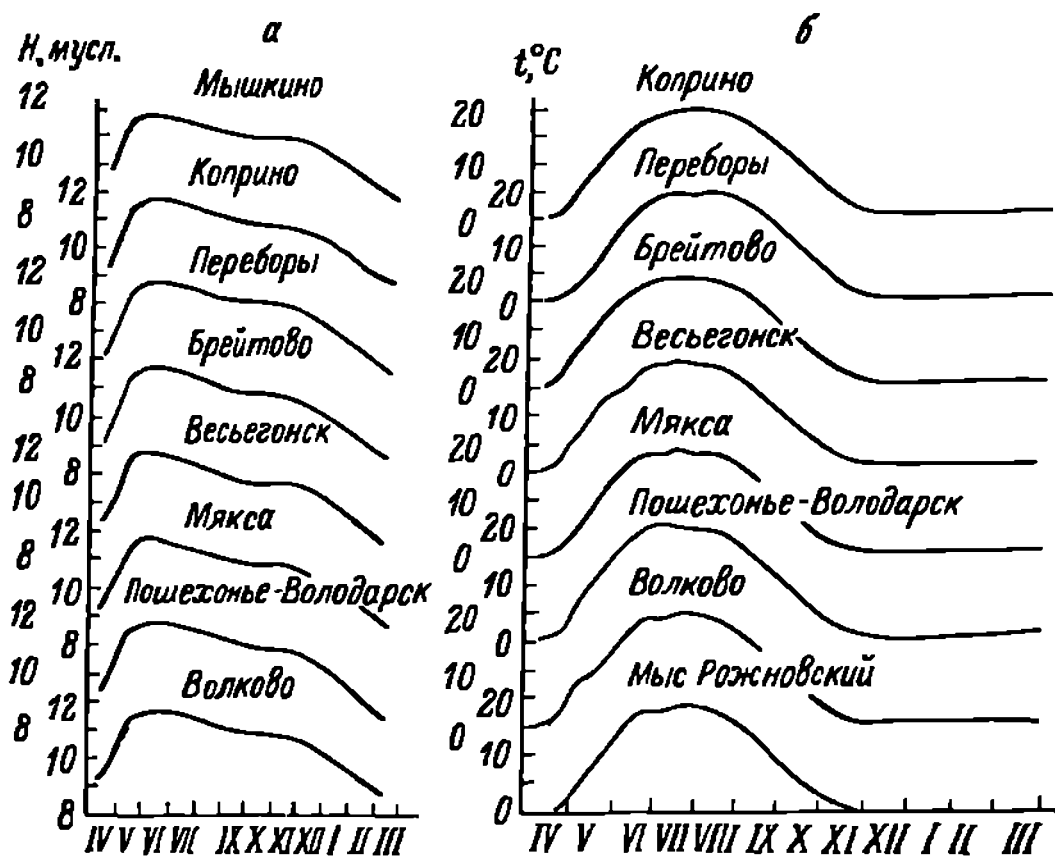


Рис. 85. Сезонные изменения уровня (а) и температуры воды (б) в Рыбинском водохранилище.

в марте—апреле приводит к увеличению стока малых, а затем и крупных рек. В результате поступления талых вод притоков и берегового склона, имеющих более высокую температуру по сравнению с водой водохранилищ, и усиления солнечной радиации температура воды в водоеме начинает постепенно повышаться. С увеличением приточности повышается и уровень водохранилищ. Судя по ходу уровненых и температурных кривых, гидрологическая весна в районе исследований приходится на апрель—первую половину июня, т. е. продолжается примерно два с половиной месяца.

Гидрологическое лето отличается от других сезонов более ровной уровненой кривой и наивысшим положением температурной кривой. Уровень водохранилищ в продолжение этого сезона, как правило, незначительно понижается, а температура воды, отличающаяся высокими значениями, может испытывать значительные колебания. При выделении данного сезона следует обращать внимание не только на положение кривых, но и учитывать характер изменений уровня и температуры. Можно считать, что гидрологическое лето длится около двух с половиной месяцев — со второй половины июня до августа включительно, а в Куйбышевском и Волгоградском водохранилищах даже несколько дольше.

Гидрологическая осень характеризуется заметным понижением уровня и быстрым охлаждением вод. Для этого сезона ход уровненой и

температурной кривых также хорошо согласуется. Заканчивается сезон выхолаживанием водных масс до низких температур, мало меняющихся во времени, и последующим ледоставом. Гидрологическая осень в большинстве рассматриваемых водохранилищ длится два месяца — сентябрь и октябрь, а иногда захватывает и первую половину ноября.

Наиболее продолжительным из всех сезонов является гидрологическая зима, которая длится около пяти месяцев. Уровенная кривая в этом сезоне в связи с зимней сработкой водохранилищ резко понижается, а температурная кривая проходит около минимальных значений и практически представляет прямую линию.

Использованный нами прием позволяет лишь весьма приближенно наметить границы гидрологических сезонов, но, несмотря на это, представление о них способствует раскрытию общих закономерностей гидрологических процессов в водохранилищах и облегчает их анализ.

Принимая за основу указанные гидрологические сезоны, рассмотрим на примере Рыбинского водохранилища по материалам наблюдений синхронных съемок особенности развития гидрологических процессов в годовом цикле. Это представляет не только самостоятельный интерес, но и необходимо также для более глубокого понимания вопросов, связанных с формированием и динамикой водных масс, и для раскрытия закономерностей биологических процессов, протекающих в водоемах замедленного водообмена.

Гидрологическая весна. Наступление положительных температур воздуха во второй половине марта, а в отдельные годы в начале апреля сопровождается таянием снега в бассейне и на акватории водоема, увеличением притока талых вод и разрушением ледяного покрова. Очищение водоема ото льда происходит неодновременно: раньше лед разрушается у г. Весьеговска, позже — у мыса Рожновского. Полное очищение водохранилища ото льда обычно наблюдается в первой половине мая.

Характерной особенностью водоема в этом сезоне является увеличение объема воды за счет аккумуляции значительной части половодья, что и обуславливает интенсивное повышение уровня (см. рис. 85). Средний объем талых вод, поступающих в водохранилище, составляет 19.4 км^3 . Из них 6.4 км^3 (33%) сбрасывается из Угличского водохранилища, 2.9 км^3 (15%) поступает из Мологи, 2 км^3 (10%) — из Шексны и 8.1 км^3 (42%) дают малые реки, склоновый сток и растаявший лед. Максимальный приток в водохранилище наблюдается в апреле и составляет в среднем около 10 км^3 . Но в отдельные годы наибольший объем притока приходится на май. Так, в мае 1955 г. суммарная величина притока составила 21.1 км^3 и превысила приток в апреле на 12.4 км^3 .

Сброс из водохранилища за тот же период равняется в среднем 7.5 км^3 , или 39% от объема половодья. За исключением многоводной весны 1955 г., когда сброс (19.4 км^3) составил 53% от притока (36.6 км^3), колебание сброса по годам и распределение его внутри сезона довольно равномерное.

Объем аккумулярованных водохранилищем талых вод составляет за сезон около 12 км^3 , т. е. примерно половину объема чаши водохранилища при нормальном подпорном уровне.

Весной на акваторию водоема выпадает около 0.58 км^3 осадков. Больше половины их (0.28 км^3) выпадает в июне, причем в июне 1955 г. осадки составили 0.57 км^3 . Объем испарившейся воды близок к сезонной сумме осадков и составляет 0.64 км^3 .

Началу сезона предшествует годовой минимальный уровень водоема, который по многолетним данным примерно на 3.8 м ниже НПУ и наблюдается в первых числах апреля. Наиболее высокий и самый низкий уро-

вень предполоводной сработки соответственно на 2.5 и 5.2 м ниже НПУ. Повышение уровня за сезон в зависимости от зимней сработки и объема половодья колебалось от 1.7 м в 1954 г. до 5.3 м в 1955 г. и составляло в среднем 3.6 м. Наиболее интенсивное наполнение водохранилища происходит в третьей декаде апреля или в начале мая, когда суточный прирост уровня достигает 20—30 см.

С наполнением водохранилища меняется его объем и площадь зеркала. При среднем уровне предвесенней сработки объем водохранилища составляет 11.6 км³, объем аккумулируемой части половодья около 12 км³, следовательно, средний объем водохранилища к концу сезона равняется примерно 23.5—24.0 км³. В многоводные годы при уровне выше НПУ объем достигает 27.5 км³. Площадь зеркала водоема при среднем уровне зимней сработки составляет около 2800 км², а при максимальном уровне наполнения около 4800 км².

Весенние съемки водоема ежегодно приурочивались ко времени полного очищения его ото льда и проводились в конце первой или начале второй декады мая.

Т а б л и ц а 67

Гидрометеорологические условия на участках Рыбинского водохранилища
в весенний период

Характеристика	Волжский	Моложский	Шекснинский	Центральная часть	Южно-шекснинский
9 V 1960 (Уровень водохранилища 115.17 м)					
Температура воздуха, °С	5 11	4.8 6.8	3.0 4.8	4.8 9.8	4.8 5.2
Скорость ветра, м/сек.	3.3 6.0	3.6 6.2	4.8 6.9	0 5.5	1.3 6.0
Направление ветра . .	СВ	СВ	СВ	ССВЗ	ССВ
Облачность, баллы . .	4 9	10	0 2	0 10	1—9
Температура воды поверхностного слоя, °С	6.0—8.7	9.2—10.1	4.0—8.0	1.4 8.8	5.3 6.3
Волнение, баллы . . .	0 2	Рябь—1	0—1	1—4	2—3
12 V 1961 (Уровень водохранилища 116.87 м)					
Температура воздуха, °С	7.6—11.8	8.4—9.2	6.0—9.0	4.8—12.0	6.1 7.5
Скорость ветра, м/сек.	0 5.5	2.0 3.4	2.6 4.3	0—6.8	2.2 2.4
Направление ветра . .	ЮЗ	З ЮЗ	ЮВ		ЮЮЗ—ЮЗ
Облачность, баллы . .	1—10	10 (туман)	2—10	1—10	10
Температура воды поверхностного слоя, °С	4.0—8.6	9.2—10.1	2.0—6.6	2.0—7.6	2.5 4.2
Волнение, баллы . . .	0 2	Рябь	Рябь	0—1	Рябь

Большинство съемок в мае проводилось при умеренных ветрах самого различного направления (табл. 67). Преобладал ветер со скоростью от 2 до 7 м/сек. и лишь в отдельных случаях до 9 м/сек. Более сильный ветер наблюдался обычно в первой половине дня, во второй половине скорость его заметно уменьшалась. При таких ветрах поверхность водохранилища находилась в относительно спокойном состоянии. Волнение в редких случаях достигало 3—4 баллов и на поверхности водоема отмечалась лишь рябь или мелкая выдь. Все съемки в мае проходили при переменной облачности, которая в течение дня колебалась от 1 (реже от 0) до 10 баллов. Обычно преобладали различные разновидности кучевых облаков.

Наиболее отчетливо различия в гидрометеорологических условиях проявляются в температуре воздуха и температуре воды поверхностного

слоя. Так, 12 мая 1961 г. температура воздуха была заметно выше, чем 9 мая 1960 г. Весьма ощутимы в эти годы и различия в температуре поверхностного слоя воды. Как правило, из-за неодновременного вскрытия водохранилища прогрев его весной идет неравномерно. Если на свободных ото льда участках плесов крупных и малых рек температура воды в начале мая 1959 г. достигала 10°, то у кромки льда она равнялась 1.3—1.7°.

Различия в температуре воды между отдельными участками водоема сохраняются длительное время и после полного его очищения. В это время наиболее теплые паводочные воды заполняют речные участки плесов крупных и малых рек, где и наблюдается максимальная для этого периода температура воды. По мере продвижения речных потоков к центру водохранилища температура их быстро понижается. Вся центральная часть в это время занята холодными зимними водами, температура которых в несколько раз ниже температуры воды речных потоков. В местах таяния последнего льда наблюдается минимальная температура воды.

При смешении теплых паводочных и холодных зимних вод создаются зоны максимальных горизонтальных и вертикальных градиентов. Так, разность между температурой воды поверхностного и придонного слоев в середине мая 1961 г. достигала 4.5°, максимальный вертикальный градиент составлял 1.1° на 1 м, а горизонтальный — около 1° на 1 км. В зависимости от метеорологических условий года абсолютные значения температуры воды могут отличаться от приведенных, но отмеченные особенности в распределении ее по площади и глубине водоема сохраняются.

В процессе прогрева водоема обычно происходит температурное расслоение его водной толщи. В отдельных случаях стратификация ее весьма значительна, но, как правило, непродолжительна. Характер вертикального распределения температуры воды в Рыбинском водохранилище рассмотрен в соответствующем разделе работы. Ветровое перемешивание, нарушающее стратификацию, способствует быстрому перераспределению тепла по глубине, и к концу сезона вся масса воды прогревается примерно до 15—20°.

При интенсивном прогреве вод быстро повышается теплозапас водохранилища. Так, если 9 мая 1960 г. общий теплозапас водоема определялся величиной $101776 \cdot 10^{12}$ кал., то к 3 июня того же года он составил уже $292729 \cdot 10^{12}$ кал., а к концу сезона превысил эту цифру примерно в 1.5—2 раза.

Величина теплозапаса водоема в значительной мере определяется объемом его водной массы и в отдельные годы может колебаться в широких пределах. Так, 3 июня 1960 г. при уровне водохранилища на 1.3 м ниже НПУ теплозапас равнялся $292729 \cdot 10^{12}$ кал., а 8 июня 1961 г. при более низкой температуре воды, но уровне выше НПУ на 0.3 м, он был равен $429653 \cdot 10^{12}$ кал. (Кондрацова, 1965).

Несмотря на аккумуляцию значительной части талых вод, полного смешивания речных вод между собой и с водами центральной части водохранилища не наблюдается. В связи с этим воды отдельных участков водоема имеют различную цветность. По цветности шекснинские и моложские воды весной можно отличить от волжских и вод центральной части водохранилища. Шекснинские и моложские воды в этом сезоне более темные и имеют цветность 60—70° и выше, тогда как цветность волжской воды обычно немного превышает 40°. Слабоокрашенными водами с цветностью ниже 40° заполнена центральная и юго-восточная части водохранилища.

Существенные различия наблюдаются между мутностью вод отдельных участков водохранилища. О характере распределения взвесей по акватории водоема в различные сезоны свидетельствует рис. 86. Весной наибольшее количество взвесей содержится в волжских и моложских водах

рис. 86, а). В направлении к центру водохранилища количество их уменьшается, что связано с постепенным оседанием речных взвесей и разбавлением вод половодья зимними водами водохранилища. В центральной части водоема содержание взвесей весной составляет 3—4 мг/л, тогда как на речных участках оно может увеличиваться до 20 мг/л (Зиминова, 1963).

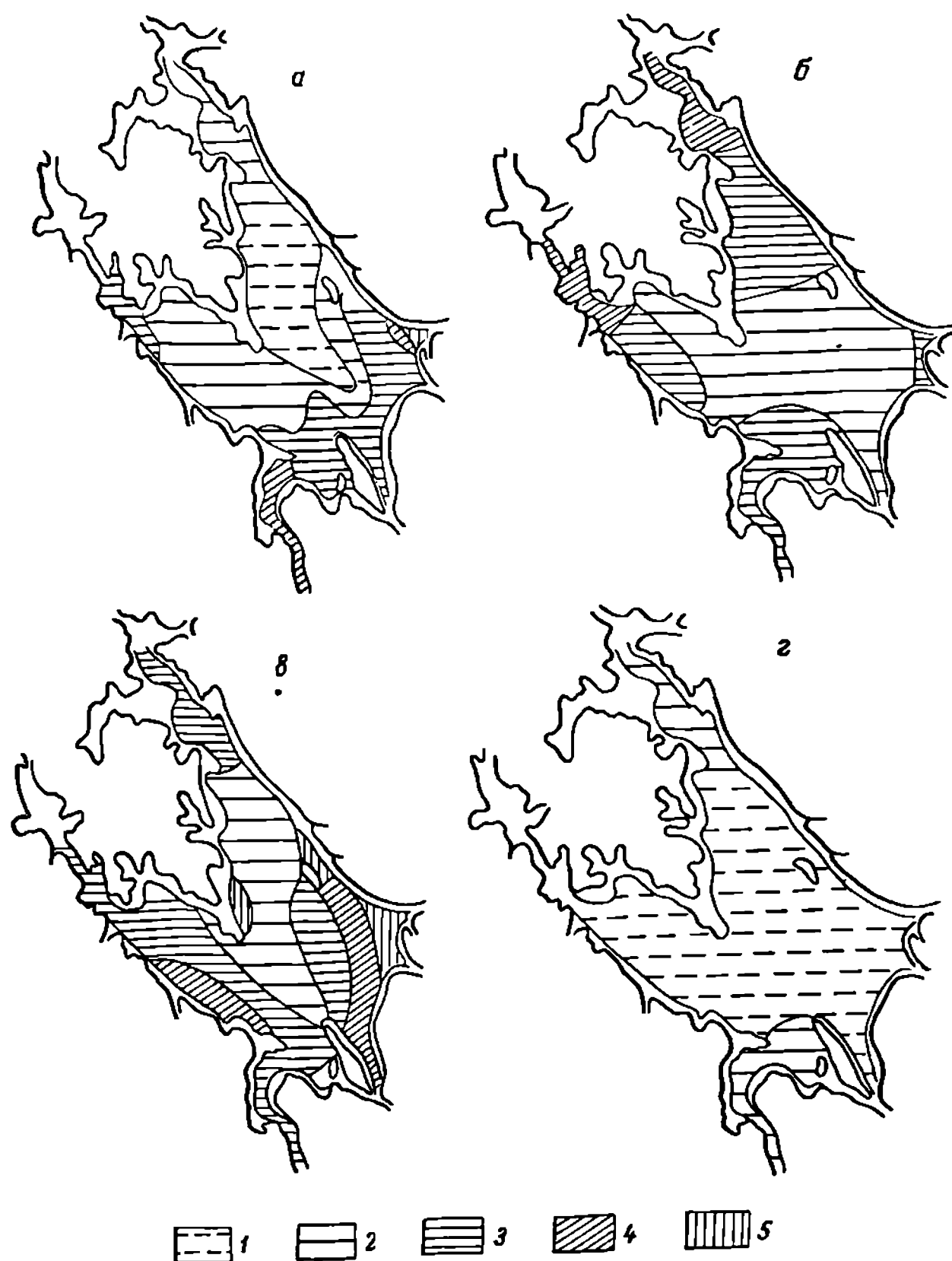


Рис. 86. Распределение взвесей в Рыбинском водохранилище весной (а), летом (б), осенью (в) и зимой (г) (по Н. А. Зиминовой, 1963).
1 — 1—2 мг/л; 2 — 2—4 мг/л; 3 — 4—6 мг/л; 4 — 6—8 мг/л; 5 — 8—15 мг/л.

Значительное количество взвешенных частиц, приносимых в водохранилище во время половодья, уменьшает прозрачность вод в нем. Изучение сезонных изменений прозрачности воды в Горьковском водохранилище показало (рис. 87, а), что наименьшая прозрачность наблюдается именно весной (Буторин, 1959б).

Таким образом, гидрологическая весна для Рыбинского водохранилища характеризуется значительным повышением уровня, а следовательно, увеличением объема и площади водоема, интенсивным прогревом его

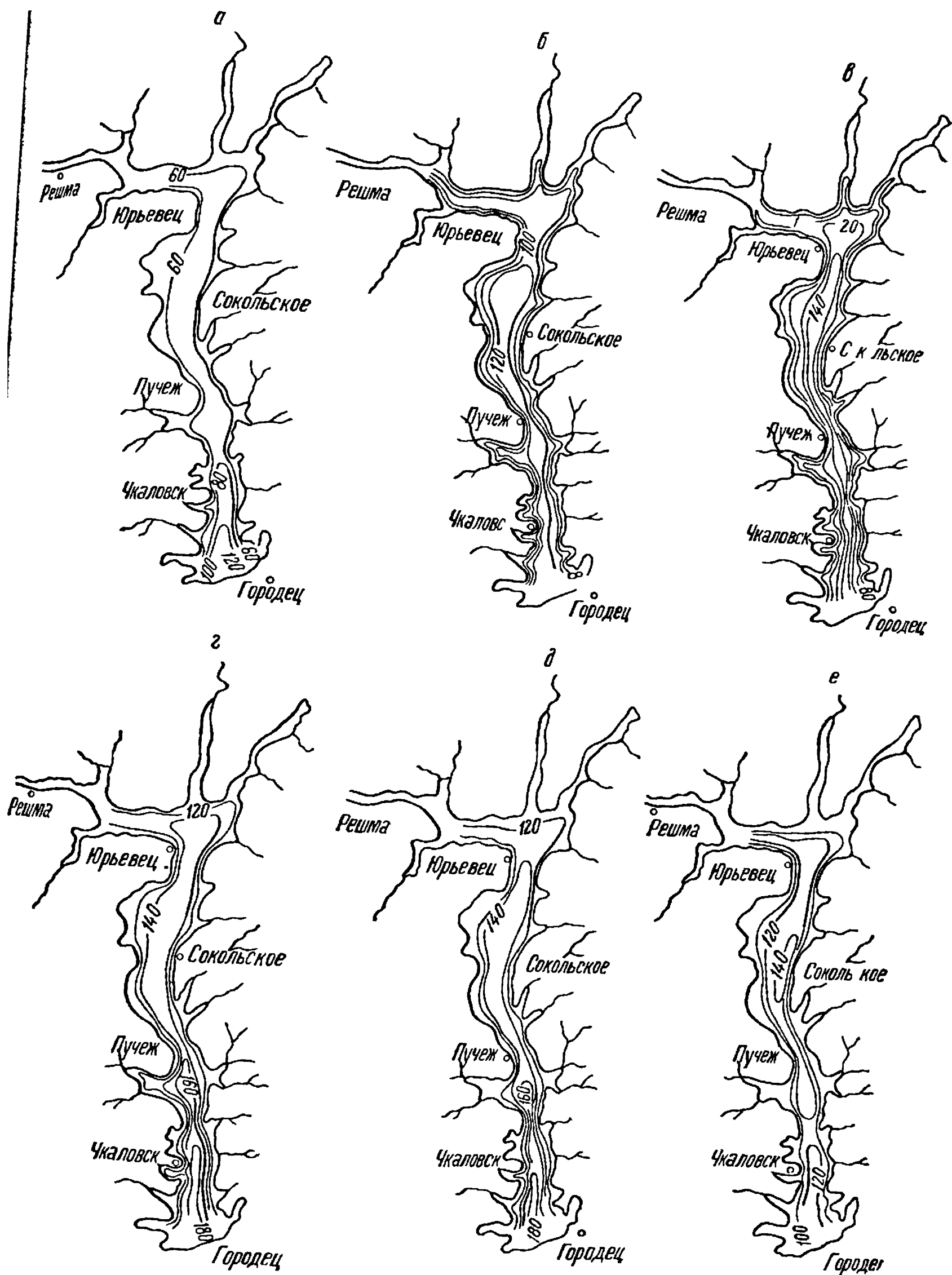


Рис. 87. Сезонные изменения прозрачности воды (в см) в расширенной части Горьковского водохранилища.

а — 20 22 мая 1956 г.; б — 4—6 июня 1956 г.; в — 6 10 июля 1956 г.; г — 23—28 августа 1956 г.; д — 15—18 сентября 1956 г.; е — 18—26 октября 1957 г.

водных масс и температурным расслоением их, а также высоким содержанием взвесей и низкой прозрачностью вод.

Значительный интерес представляют гидрометеорологические условия в районе водохранилища в переходный период от гидрологической весны к лету. В ходе гидрологической весны наряду с повышением температуры воздуха и уровня водохранилища происходит интенсивный прогрев его вод. Обычно в первой декаде июня наполнение водохранилища заканчивается. К этому времени уровень воды в водоеме достигает максимальных значений, хотя абсолютные отметки его от года к году меняются. Если в многоводные годы уровень в это время превышает отметки НПУ, то в маловодные годы максимальные отметки наполнения водохранилища могут быть на 2 м и более ниже НПУ.

Температура воздуха над акваторией водохранилища к концу весны обычно достигает 10—15 . Как и в мае, в это время в отдельные годы она испытывает значительные колебания, сохраняя при этом те же особенности распределения над акваторией водоема: наиболее высокие значения отмечаются в волжском районе и центральной части водохранилища. Одновременно с температурой воздуха повышается и температура поверхностного слоя воды. В этот период в большинстве случаев температура поверхностного слоя воды близка к температуре воздуха или даже выше ее. Как правило, абсолютные значения температуры на поверхности воды в первой половине июня колеблются около 15—16°, но иногда превышают 20° (табл. 68). Наиболее высокие температуры воздуха и поверхностного слоя воды в первой половине июня наблюдались в 1961 г., а наиболее низкие — в 1963 г.

Т а б л и ц а 68

Гидрометеорологические условия на участках Рыбинского водохранилища в переходный период от весны к лету

Характеристика	Волжский	Моложский	Шекснинский	Центральная часть	Южно-шекснинский
3 VI 1960 (Уровень водохранилища 115.51 м)					
Температура воздуха, °С	14.8—20.0	14.8—15.8	15.4—15.5	15.0—22.7	14.3—15.0
Скорость ветра, м сек.	0—3.44	2.4—3.9	2.2—3.2	0—8.67	3.7
Направление ветра	ЮЗ—СЗ	ЮЗ—ССЗ	З—ЮЮВ	ЮЮЗ—СЗ	Ю—ЮЮВ
Облачность, баллы	6—10	8—10	10	0—10	4—6
Температура воды поверхностного слоя, °С	15—17.8	16.8—18.0	14.4—15.6	14.8—18.1	15.8—16.6
Волнение, баллы . .	0—рябь	0—рябь	Рябь	0—3	0—2
8 VI 1961 (Уровень водохранилища 117.11 м)					
Температура воздуха, °С	18.7—21.5	15.9—18.2	16.8—18.2	18.0—26.0	18.0—18.8
Скорость ветра, м сек.	2.11—4.4	2.25—3.78	0—2.26	0—3.16	0—3.16
Направление ветра	СЗ	ЮЗ—С	С—ССВ	З—СЗ	З
Облачность, баллы	1—9	2—4	1—2	0—9	1
Температура воды поверхностного слоя, °С	18.6—21.0	17.9—20.6	17.2—18.5	17.2—23.4	17.8
Волнение, баллы . .	Рябь	0—1	Рябь	0—1	1

Все съемки в этот период проводились при умеренных и даже слабых ветрах. Обычно скорости ветра в первой половине дня редко превышали 4 м/сек. Во второй половине дня ветер несколько усиливался и скорость его при отдельных измерениях достигала 8—9 м/сек. Направление ветра во время съемок было относительно постоянным. Преобладающими были ветры западных направлений (см. табл. 68). При таких ветрах водная поверхность водохранилища находится в спокойном состоянии и перемешивание вод практически отсутствует. Во всех районах водохранилища наблюдалась лишь небольшая рябь, которая иногда переходила в легкую зыбь. Незначительное волнение отмечалось в редких случаях к концу дня в центральной части и южношекснинском районе.

Большинство съемок в июне проводилось при значительной облачности. Наблюдалось различные формы кучевых облаков.

Гидрологическое лето. Гидрологическое лето наступает в Рыбинском водохранилище в конце июня, когда заканчивается весенний прогрев вод и температура их достигает величин, близких к максимальным для данного года. Другой характерной особенностью этого сезона является относительное постоянство уровня водохранилища, который обычно близок к максимальному уровню наполнения.

Абсолютная отметка среднего многолетнего уровня за сезон на 0.5—0.7 м ниже НПУ, при крайних значениях на 2 м ниже и 0.3 м выше его. В соответствии с уровнем средняя площадь зеркала водоема составляет 4 200—4 300 км², объем — 22.4—23.2 км³. При наиболее высоком уровне площадь зеркала увеличивается до 4 650 км², а объем — до 26.4 км³. Минимальные значения площади и объема водохранилища для данного сезона соответственно равны 3 600 км² и 17.3 км³.

Объем притока в водохранилище составляет за сезон около 3.5 км³ с колебаниями по годам от 1.9 до 5.4 км³. Волга и Шексна приносят в водохранилище примерно по 1.1 км³, что дает 62% притока. Около 1 км³, или 29%, дают малые реки и только 0.3 км³ Молога. На акваторию водоема за сезон выпадает примерно 0.7 км³ осадков с колебаниями по годам от 0.3 до 1.1 км³, а объем испарившейся воды за это же время составляет около 1 км³ (от 0.8 до 1.2 км³).

Средний объем сброса из водохранилища через ГЭС равняется 4.8 км³, что превышает величину притока на 1.3 км³ и приводит к постепенному понижению уровня (Буторин, 1963в).

Синхронные съемки в летний период обычно приурочивались ко времени максимального прогрева водной толщи водохранилища и проводились в конце июля—начале августа. Обыкновенно в годы, средние по водности и маловодные, приток воды в Рыбинское водохранилище не восполняет потери за счет работы ГЭС и испарения, поэтому, как правило, в летний период уровень имеет общую тенденцию к понижению. Абсолютные отметки уровня и некоторые другие характеристики гидрометеорологических условий для данного сезона по участкам водохранилища представлены в табл. 69. Из нее видно, что летом отдельные характеристики испытывают значительные колебания. Это относится прежде всего к температуре воздуха.

Температура воздуха летом в дневные часы иногда достигает 30°, а рано утром может понижаться до 8°. Это связано с метеорологическими особенностями года. Так, в 1963 г. гидрометеорологические условия в первых числах сентября мало отличались от условий в начале августа. Температура воздуха в сентябре была даже выше, чем в августе, а температура поверхностного слоя воды практически оставалась такой же. Следовательно, в этом году в начале сентября в водохранилище прослеживались процессы, характерные для летнего периода. Особенно жарким

Гидрометеорологические условия на участках Рыбинского водохранилища
в летний период

Участок	В л ж и й	М л ж н и й	Шекснинский	Центральная часть	Ю ж н ы й
---------	-----------	-------------	-------------	-------------------	-----------

28 VII 1960
Уровень водохранилища 114.81 м)

Температура воздуха, °С	20	24.5	23.2	23.8	23.0	24
Скорость ветра, м/сек.	5.6	6.3	6.3	8.1	10.9	5.7
Направление ветра	В-ЮВ	ЮВ	В	В	ЮВ	В
Облачность, баллы	0	7	6	7	0	10
Температура воды поверхностного слоя, °С	28	24.0	23.2	23.6	23.0	24.7
Волнение, баллы	0	2	2	0	4	1

3 VIII 1961
(Уровень водохранилища 116.81 м)

Температура воздуха, °С	17.2—20.8	15.0	17.0	17.8	18.5	17.2	23.8	18.8	20.1
Скорость ветра, м/сек.	2.56	8.29	2.12—5.70	7.05	8.10	0	8.80	7.0	7.8
Направление ветра	С	СЗ	ЮЗ	СЗ	С	СЗ	СЗ	СЗ	СЗ
Облачность, баллы	2	3	0	5	4	8	1	8	—
Температура воды поверхностного слоя, °С	21.0	21.4	20.9	21.6	21.0	21.2	20.3	22.8	20.8
Волнение, баллы	1	5	0	2	2	0	4	1	1

было лето 1960 г., а наиболее низкая температура воздуха для данного сезона отмечалась в начале августа 1962 г.

Значительные различия в температуре воздуха над отдельными участками водохранилища сглаживаются в температуре воды. Этому способствует ветер. Летний режим ветра мало отличается от весеннего. Все съемки летом проводились при умеренных ветрах. Лишь 28 июля и 3 августа 1961 г. скорость ветра достигала 6 м/сек. и даже 10 м/сек. Преобладающими были ветры южных направлений. Волнение при таком ветровом режиме развивается слабо. В речных районах водохранилища оно обычно выражалось в виде ряби и в редких случаях достигало 1—2 баллов, в открытой части водоема иногда увеличивалось до 4 баллов.

Большинство съемок летом выполнено при переменной облачности 3—7 баллов, в редких случаях 10 баллов. При таких метеорологических условиях температура поверхностного слоя воды обычно превышала температуру воздуха и лишь летом 1960 г. была близка к ней. В период максимального прогрева вод водохранилища температура поверхностного слоя воды обычно колеблется около 20—22°. Существенных различий в ее значениях по участкам водохранилища не наблюдается. Наибольший прогрев водохранилища наблюдался летом 1960 г., когда температура воды на поверхности водоема на всех участках превышала 22°, а на отдельных станциях достигала 25°. Даже незначительное ветровое перемешивание способствует быстрому распространению тепла в придонные слои. В результате этого уже в начале лета температуры воды поверхностного и придонного слоев близки друг к другу. Если температура верхнего 2-метрового слоя воды в летний период колеблется около 20—

23, то на придонных горизонтах она изменяется в пределах 18–22. Максимальные значения отмечаются на речных участках, вблизи мелководий и на мелководьях междуречья. Несколько ниже температура воды по руслам затопленных рек.

В соответствии с равномерным прогревом водной толщи величина теплозапаса придонных слоев мало отличается от поверхностных. Так, 3 августа 1961 г. теплозапас верхнего 2-метрового и придонного слоев от 5-метровой изобаты и глубже при близких значениях их объемов был почти одинаковым и составлял соответственно $172\,931 \cdot 10^{12}$ кал. и $175\,200 \cdot 10^{12}$ кал. (Кондрацова, 1965).

Летом сохраняются различия в цветности вод отдельных участков водохранилища. По осредненным данным М. А. Фортунатова (1959), в летний период максимальная цветность воды выше 100, отмечается лишь в моложской воде выше сел. Харламовского. От с. Хартамовского до Борка заповедного цветность воды снижается до 80–100. Такая же цветность отмечается в шексинской воде вверх по течению от сел. Мякса. Воды шексинского потока от сел. Мякса до бывшей дер. Ягорбы и моложского южнее Борка заповедного, так же как и воды вдоль северо-восточного и восточного берегов водохранилища, обычно менее окрашены и цветность их колеблется от 60 до 80. Наименее цветные воды наблюдаются в центральной части водохранилища и в волжском потоке.

В годы с различной водностью абсолютные значения и распределение цветности по акватории водоема заметно отличаются от приведенных средних величин. Так, летом маловодного 1960 г. по всей акватории водоема цветность была ниже средней, а темноокрашенные воды наблюдались лишь в верховьях Мологи и Шексны. В многоводном 1961 г. летом абсолютные значения цветности были примерно вдвое выше, чем в 1960 г.

С уменьшением проточности и, следовательно, с увеличением продолжительности пребывания водных масс в водохранилище в летний период количество взвесей уменьшается (см. рис. 86). Как и весной, мутность воды летом на речных участках выше, чем в центральной части. По количеству взвесей среди рек, питающих водохранилище, на первом месте стоит Шексна. Это обусловлено наличием в истоке ее мелководного Белого озера, илы которого при взмучивании во время штормов создают значительную мутность воды (Курдин, 1960). На шексинском участке количество взвесей летом достигает 12 мг/л, тогда как на моложском оно составляет 10 мг/л, а на волжском — 8.5 мг/л. В центральной части водоема содержание их колеблется около 2–4 мг/л (Зиминова, 1963). К концу лета в результате массового развития фитопланктона и усиления ветровой активности, а на речных участках и за счет дождевых паводков количество взвесей увеличивается.

Обратная картина наблюдается в изменении прозрачности. Прозрачность вод летом выше, чем весной. На примере расширенной части Горьковского водохранилища видно, что уже в июне прозрачность заметно увеличивается (рис. 87, б). Если в мае величина прозрачности 120 см отмечалась только вблизи плотины, то в июне эта изолиния оконтуривает русловую часть водохранилища почти до г. Юрьевца. В июле продолжается дальнейшее повышение прозрачности (рис. 87, в), а в августе она достигает максимальных значений в навигационный период (рис. 87, г). На приплотинном участке хорошо прослеживается изолиния прозрачности 180 см.

Таким образом, гидрологическое лето характеризуется максимальным прогревом водной толщи и относительно постоянным положением уровня водохранилища, общим понижением мутности вод и увеличением их цветности и прозрачности.

Гидрологическая осень. В Рыбинском водохранилище наступает с установлением постоянного отрицательного теплового потока из водоема в атмосферу и с началом интенсивного охлаждения его водной толщи. Увеличение расходов Рыбинской ГЭС и превышение сброса из водохранилища над притоком в среднем на 1.3 км^3 , а в отдельные годы на 3.3 км^3 способствует проникновению речных вод в центральную часть водоема и вызывает систематическое понижение уровня воды.

За сезон на акваторию водохранилища выпадает в среднем 0.4 км^3 осадков, а средний объем испарившейся воды составляет около 0.5 км^3 . Следует, однако, отметить, что в отдельные годы обильные осенние осадки в бассейне водоема обуславливали превышение притока над сбросом, что вызывало осенний подъем уровня. Такое явление с 1947 по 1960 г. наблюдалось пять раз, причем максимальная величина осеннего повышения уровня равнялась 0.8 м (Буторин, 1963в).

Средняя величина площади водохранилища осенью составляет 4050 км^2 , а объем — 21.1 км^3 . При максимальном уровне в сезоне площадь увеличивается на 400 км^2 , а объем — на 3.1 км^3 . С началом осенней сработки водохранилища возрастает его водообмен. Средний многолетний коэффициент водообмена для октября равен 0.14 , но в сезоны с большим осенним паводком он может увеличиваться более чем вдвое.

Гидрометеорологические условия осеннего периода имеют особо важное значение для зимнего режима водоема: от них прежде всего зависит величина осеннего охлаждения водоема, а следовательно, и начало ледообразования.

Температура воздуха в первой половине осени обычно колеблется в пределах $5-10^\circ$ и очень незначительно меняется по районам водохранилища (табл. 70). Амплитуда ее колебаний в осенний период значительно меньше, чем летом. Во второй половине осени температура воздуха быстро понижается и в конце октября—начале ноября переходит через 0° . В отдельные годы отрицательные температуры воздуха отмечались уже в последней декаде октября. Так, во время съемки 27 октября 1960 г. температура воздуха над водоемом колебалась от -2.4 до -4.3 .

Понижение температуры воздуха в осенний период совпадает с усилением циклонической деятельности и западно-восточного переноса воздушных масс, который в свою очередь приводит к устойчивым по продолжительности и направлению ветрам и увеличению их скорости. В этом сезоне в районе Рыбинского водохранилища ветры со скоростями $6-10 \text{ м/сек.}$ составляют около $20-30\%$. Наиболее часты они во вторую половину осени. Направление осенних ветров более устойчиво, чем летних. Во время осенних съемок преобладали ветры южного направления, (от юго-восточного до юго-западного) и только 27 октября 1960 г. был отмечен ветер северного и восточного направлений. При этих направлениях ветра вся центральная часть водохранилища и примыкающие к ней участки водоема подвержены значительному волновому воздействию. Даже на речных участках в осенний период волнение увеличивается до 2 баллов, а в центральной части достигает $4-5$ баллов.

Температура поверхностного слоя воды осенью заметно выше температуры воздуха (см. табл. 70). До начала ледостава существенных различий в температуре поверхностного слоя воды по участкам водохранилища не наблюдается, но, как правило, в волжском районе и центральной части водоема она несколько выше. С началом ледостава различия в температуре воды на отдельных участках водохранилища заметно увеличиваются. Наиболее низкая температура воды до образования Шекснинского водохранилища отмечалась в шекснинском и моложском районах. В то время как на речных участках идет интенсивное ледообразование,

Гидрометеорологические условия на участках Рыбинского водохранилища в осенний период

Характеристика	Волжский	Моложский	Шекснинский	Центральная часть	Южно-шекснинский
4 X 1960 (Уровень водохранилища 114.63 м)					
Температура воздуха, °С	8.5 10.6	6.0 7.0	6.3—6.6	6.8 9 6	5.0—7.2
Скорость ветра, м/сек.	3.73 8.72	3.10 4.80	7.5—8.1	5.55 11.6	7.54 4 18
Направление ветра	ЮЗ	ЮЗ	ЗЮЗ—З	ЮЗ	Ю—ЮЮЗ
Облачность, баллы	10	10	10	10	8
Температура воды поверхностного слоя, °С	9.2—10.6	8.6 8.8	8.4—8.6	7.7—9.7	8.3—8.8
Волнение, баллы . .	0—4	0 1	1—2	1—4	1 2
10 X 1961 (Уровень водохранилища 116.28 м)					
Температура воздуха, °С	5.2 8.6	4.1—5.2	5.5—7.8	5.8—12.4	5.6—7.2
Скорость ветра, м сек.	1.49—4.45	1.37—4.68	3.67 5.0	2.34 7.80	1.92—3.13
Направление ветра	ЮЗ—Ю	ЗЮЗ—ЮЮЗ	З—ЮЗ	ЮЗ	ЮЗ
Облачность, баллы	0 4	10	0	0 10	0
Температура воды поверхностного слоя, °С	9.8—10.2	9.4	9.6 10.0	9.2—10.2	9.8
Волнение, баллы . .	Рябь	—	1—2	1—3	1

в центральной части водохранилища средняя температура воды составляет около 3 (Буторин, 1963г).

Понижение температуры воды в течение сезона идет довольно равномерно во всей толще. В среднем падение температуры воды на поверхности составляет за сутки 0.2°, достигая в отдельных случаях 0.5° (Рутковский, 1963а). За первых два осенних месяца температура воды в водохранилище снижается в среднем от 16—17 до 3—5 , т. е. примерно на 12—13 . Температура воды в начале сезона одинакова почти по всему водоему, но уже в это время намечается некоторое понижение ее к речным участкам Шексны, Мологи и малых рек. К концу осени в результате выхолаживания мелководий возрастает и разница в температурах по площади водоема. Температура воды в центральной части водохранилища и в волжском потоке на 1—2.5° выше, чем на остальных участках водоема, и ледостав здесь наступает позднее (Буторин, 1963г).

Несмотря на увеличение водообмена и интенсивное ветровое перемешивание воды с наибольшей цветностью в этом сезоне прослеживаются в моложском потоке — до выхода в открытую часть водохранилища, в шекснинском — до сел. Мякса и заполняют предустьевые участки рек Ухры и Согожи. Воды с наименьшей цветностью несет волжский поток. В центральной части водохранилища воды имеют промежуточную цветность между более окрашенными водами Мологи и Шексны и менее окрашенными водами волжского потока. При среднем и небольшом притоке вод в водохранилище распределение цветности по его акватории более равномерно. В такие годы, особенно после продолжительных штормовых ветров, цветность вод на отдельных участках водохранилища вы-

равнивается. Как в маловодный 1960 г., так и в многоводный 1961 г. различия в цветности воды по акватории на поверхности не превышали 10, а по глубине — 20. В годы с обильными осенними осадками цветность речных вод и распределение ее по акватории могут существенно меняться.

Содержание взвесей в воде речных участков водохранилища в начале осени такое же, как и в конце лета. С наступлением заморозков и уменьшением количества паводков, поступающих с водосбора, количество взвесей на речных участках уменьшается и, по данным Н. А. Зиминской (1963), не превышает 5 мг/л. В центральной части водоема количество взвесей осенью может значительно изменяться в зависимости от ветровых условий. Усиление ветровой деятельности влечет за собой увеличение содержания взвесей в воде в результате их взмучивания со дна водоема. Распределение взвесей по акватории водоема в этом сезоне представлено на рис. 86, в.

В соответствии с мутностью изменяется и прозрачность воды. Из рис. 87, д, видно, что в сентябре она мало отличается от прозрачности воды в августе. С усилением ветровой деятельности в октябре картина распределения прозрачности становится довольно пестрой (рис. 87, е). На озеровидных участках водохранилища она заметно уменьшается.

Таким образом, характерной особенностью гидрологической осени является интенсивное охлаждение водной толщи водохранилища, понижение его уровня и относительно равномерное распределение гидрологических характеристик по акватории и глубине водоема.

Гидрологическая зима. Устойчивый переход температуры воздуха через 0 к отрицательным значениям над акваторией Рыбинского водохранилища наблюдается во второй половине октября или в начале ноября. После этого прекращается поверхностный сток, начинается накопление осадков в виде снега и водохранилище покрывается льдом. Наиболее ранние сроки ледостава относятся к концу октября, а наиболее поздние — к первой декаде декабря. Сроки наступления ледостава в отдельных районах водохранилища различные. По многолетним данным, наиболее ранний ледостав наблюдается в шекснинском районе, а наиболее поздний в Переборском заливе, поэтому дата установления льда в последнем принимается нами за начало зимнего периода.

Существенной особенностью гидрологической зимы является повышенный водообмен в водоеме, так как начало сезона совпадает с началом интенсивной сработки водохранилища. Коэффициенты водообмена зимой почти в 2 раза выше, чем летом. Средний приток воды в водохранилище за сезон составляет 7.6 км³. Из них 3.5 км³, или 46%, поступает из Угличского водохранилища; 0.67 км³, или 8.8%, — из Мологи и 1.3 км³, или 17.1%, — из Шексны. Остальные 28.1% притока дают малые реки. Максимальный приток наблюдается в начале сезона, минимальный — в конце его.

Сброс воды Рыбинской ГЭС за сезон составляет 14.6 км³, или 192% по отношению к притоку. Такое несоответствие приходной и расходной составляющих водного баланса приводит к значительному уменьшению объема и площади зеркала водоема.

Изменения в объеме водной массы определяют и колебания уровня в этот период. Средний уровень водохранилища в начале сезона обычно колеблется около отметки 1.3 м ниже НПУ, при крайних значениях соответствует НПУ и на 2.6 м ниже его. В зависимости от водности года и режима работы ГЭС в начале зимы может быть как повышение, так и понижение уровня. Наибольший подъем уровня в период ледостава (0.9 м) отмечался в ноябре 1952 г. Общее понижение уровня водохранилища за сезон в среднем составляет 2.5 м с колебаниями по годам от 0.9

до 3.8 м. Особенно резко снижается уровень (примерно на 0.7 м) с января по февраль.

Значительные колебания уровня приводят к аналогичным изменениям площади зеркала водоема, которая в отдельные годы уменьшается за зиму

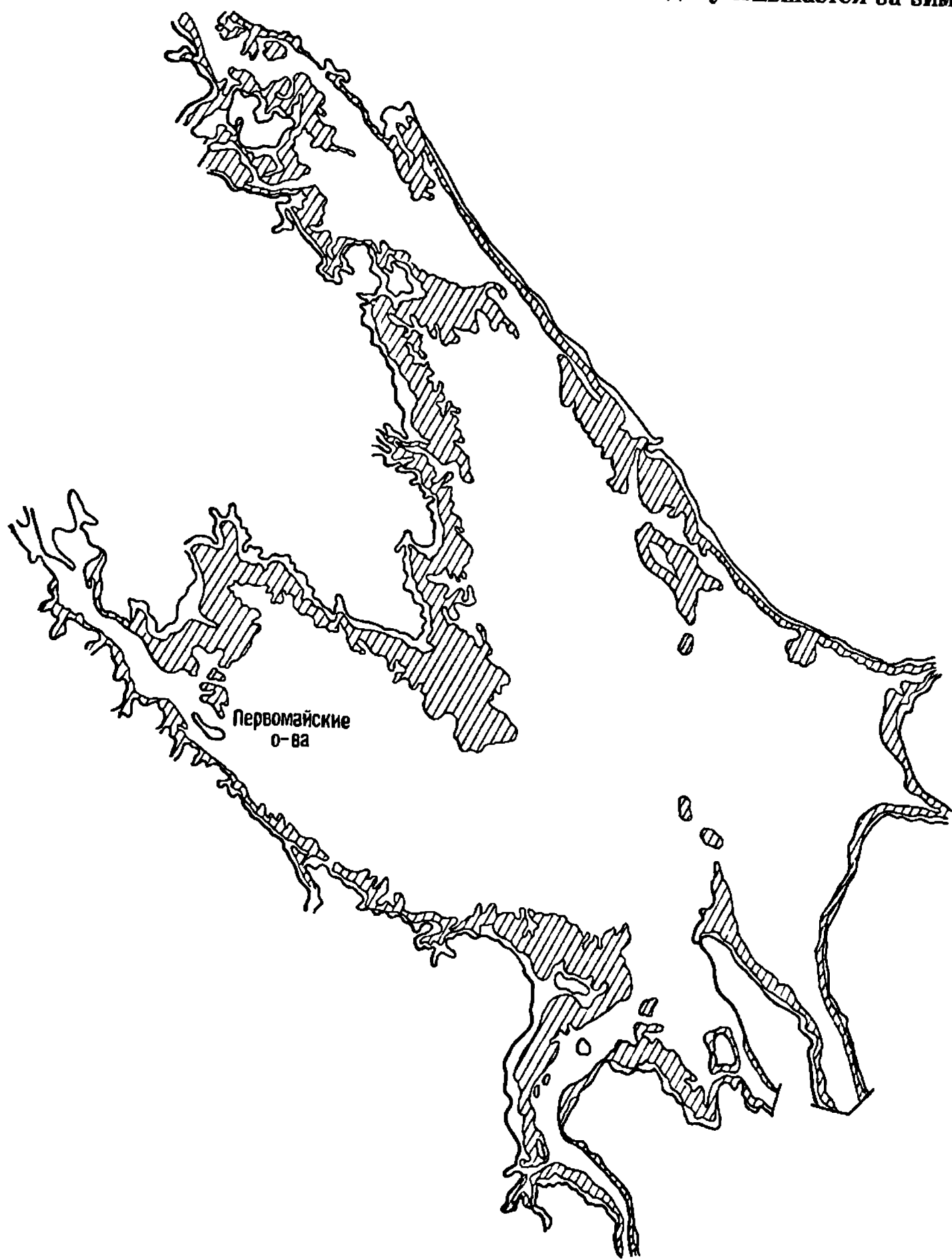


Рис. 88. Осушаемая зона Рыбинского водохранилища (заштрихованная часть).

на 2330 км². Средняя величина осушаемой за это время площади составляет около 1050 км² (показана штриховкой на рис. 88).

С началом зимы температура воздуха продолжает систематически понижаться и обычно в январе достигает минимальных в году значений. Во время проведения съемок температура воздуха колебалась в широких пределах: от положительных значений в феврале 1961 г. до —30 в январе 1962 г. (табл. 71).

гидрологические условия на участках Рыбинского водохранилища
в зимний период

	Волжский	Моложский	Шекснинский	Центральная часть	Южно-шекснинский
14 24 II 1961 (Уровень водохранилища 99.63 м)					
Температура воздуха	от -18.9 до 1.3	от -18.9 до 1.3	от -18.9 до 1.3	от -18.9 до 1.3	от -18.9 до 1.3
Скорость ветра	0-14	0-14	0-14	0-14	0-14
Направление ветра	Ю-СЗ	Ю-СЗ	Ю-СЗ	Ю-СЗ	Ю-СЗ
Температура воды	0.0-0.2	0.2-0.4	0.1	0.0-0.4	0.2
Толщина льда, см	37-48	42-57	50-54	46-60	24
Высота снега, см	3-19	4-6	19-20	14-18	
30 I-10 II 1962 (Уровень водохранилища 99.28 м)					
Температура воздуха	от -30.7 до 1.8	от -30.7 до 1.8	от -30.7 до 1.8	от -30.7 до 1.8	от -30.7 до 1.8
Скорость ветра, м/сек	1-12	1-12	1-12	1-12	1-12
Направление ветра	ЮЮВ-ЮЮЗ	ЮЮВ-ЮЮЗ	ЮЮВ-ЮЮЗ	ЮЮВ-ЮЮЗ	ЮЮВ-ЮЮЗ
Температура воды в верхнем слое, °С	0.0	0.1	0.0-1.3	0.0-1.3	0.0-1.3
Толщина льда, см	37-62	-	37-62	37-62	37-62
Высота снега, см	12-40	10	12-40	12-40	12-40

Особенностью зимнего периода является интенсивная циклоническая деятельность, которая сопровождается западно-восточным переносом воздушных масс. В связи с этим преобладающими ветрами сезона являются западные и юго-западные. По скорости зимние ветры менее устойчивы, чем по направлению.

В течение зимы, когда водная поверхность водохранилища изолирована от непосредственного воздействия ветра ледяным покровом, перемещение вод в водоеме происходит только за счет стоковых течений. В результате интенсивной сработки водохранилища стоковые течения зимой выражены наиболее отчетливо и играют определяющую роль в циркуляции его вод.

Увеличение проточности водохранилища оказывает существенное влияние на температуру воды и ее распределение по акватории водоема. Температура поверхностного слоя воды при наличии ледяного покрова близка к 0° и по участкам водохранилища меняется незначительно. Наиболее низкая температура наблюдается в речных потоках, где она в течение всей зимы ниже 1°. С выходом потоков в расширенные части плесов и уменьшением скорости течения температура воды заметно повышается. Так, в шекснинском потоке уже в районе дер. Вичелово и бывшей дер. Ягорбы температура воды, как правило, выше 1°. В центральной части водоема температура весьма неоднородна и резко колеблется по годам.

Заметное увеличение водообмена в период гидрологической зимы не приводит к полному перемешиванию вод по акватории и глубине

водоема. Это легко установить прежде всего по распределению цветности в водоеме. По данным М. А. Фортунатова (1959), в середине зимы наименьшую цветность (40—60) имеют волжские воды, занимающие всю южную и юго-восточную часть водохранилища. Под влиянием моложских и шекснинских вод цветность в центральной части водохранилища повышается до 60—80, а вверх по Мологе и Шексне — до 80—100. В зависимости от гидрометеорологических особенностей года цветность воды отклоняется от средних значений. Так, в суровую зиму 1955/56 г. большая часть водохранилища была заполнена слабоокрашенными водами с цветностью 40—50, и наоборот, зимой 1953/54 г. цветность вод волжского потока и центральной части водохранилища превышала средние показатели и достигала в центре водоема и в Переборском заливе 100. Значительно ниже средних значений была цветность в зиму 1960/61 и 1961/62 г. Абсолютные значения цветности вод речных потоков и центральной части водоема не превышали 50—60.

Характерной особенностью зимнего периода являются минимальные количества взвесей в водах водохранилища и незначительные различия в их распределении по акватории водоема (рис. 84, д). После ледостава количество взвесей в центральной части водохранилища равняется 2—3 мг/л, а в течение зимы уменьшается до 1—2 мг/л (Зиминова, 1963). В этом сезоне наблюдается наибольшая прозрачность вод в годовом цикле.

Таким образом, гидрологическая зима характеризуется систематическим уменьшением объема водной массы и понижением уровня водохранилища, усилением стоковых течений, низкими температурами воздуха и воды, незначительной мутностью и большой прозрачностью вод.

Анализ многолетних гидрологических материалов и, в частности, данных синхронных съемок Рыбинского водохранилища показал, что характеристики гидрологического режима водохранилищ в годовом цикле сильно меняются. Сезонный ход их определяется прежде всего метеорологическими условиями. Однако в отличие от естественных водоемов замедленного водообмена на сезонную изменчивость гидрологических процессов в водохранилищах существенное влияние оказывает также антропогенный фактор. Искусственное регулирование объема вод обуславливает особенности водного баланса водохранилищ, сезонного хода уровня, температурного и ледового режима и циркуляции водных масс.

С сезонной изменчивостью режимных характеристик водохранилищ тесно связано развитие в них биологических процессов. Так, особенности гидрологической весны имеют большое значение для размножения и развития промысловых рыб и других организмов. В течение гидрологического лета происходит развитие основной массы беспозвоночных животных и растений. В этот сезон воды водохранилищ наиболее богаты животной и растительной жизнью. Гидрологическая осень характеризуется резким обеднением жизни водоемов, так как основная масса растительных и животных организмов, особенно планктонных, закончив годовой жизненный цикл, отмирает. В период гидрологической зимы у большинства организмов резко понижается жизнедеятельность, почти прекращается питание, рост и развитие. У рыб и беспозвоночных уменьшается активность. Таким образом, сезонные особенности гидрологических процессов оказывают существенное влияние на развитие водных животных и растений. Анализ этих особенностей поможет разобраться в сложном ходе биологических явлений, протекающих в водах водохранилищ.

Исследование гидрологических процессов в водохранилищах волжского каскада и их сезонной изменчивости на примере Рыбинского водохранилища позволило установить наличие в указанных водоемах гетерогенности водных масс. Изучению этого вопроса и посвящена вторая часть данной работы.

ФОРМИРОВАНИЕ И ДИНАМИКА ВОДНЫХ МАСС В ВОДОХРАНИЛИЩАХ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА

Основной задачей анализа водных масс любого водоема является правильное выделение отдельных разновидностей вод и их качественная характеристика. Решение ее может быть обеспечено лишь при условии правильного, физически обоснованного подбора критериев, или признаков, которые должны лечь в основу выделения водных масс. Вопрос о признаках или показателях является одним из основных вопросов в учении о водных массах. Не менее важным является вопрос о методах выделения водных масс. Из самого определения водной массы следует, что в настоящее время не существует единого метода выделения водных масс не только в континентальных водоемах, но даже в морях и океанах. Поскольку каждый водоем обладает своими индивидуальными особенностями в распределении в ходе физических и химических характеристик вод, то естественно, что методы выделения водных масс должны в какой-то мере учитывать специфику гидрологических процессов в водоеме.

Глава III

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ И МЕТОДЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДНЫХ МАСС В ПРЕСНЫХ ВОДОЕМАХ

Определение понятия «водная масса»

Понятие «водная масса» является в известной степени условным, поэтому часто в него вкладывается различное содержание. Обычно при исследовании водных объектов любой объем воды называют «водной массой» без указания на его специфические свойства. Иными словами, понятие «водная масса» очень часто отождествляется с понятием «масса воды», когда говорят о любой воде, как о веществе, наполняющем чашу моря или другого водоема. Между тем эти понятия совершенно различны. Первое из них в отличие от второго должно содержать физические, химические, биологические показатели и характеристику происхождения, распределения и динамического состояния вод водоема. В связи с этим необходимо резко различать понятие «водная масса» как некая индивидуальность со свойствами только ей физико-химическими и биологическими характеристиками и понятие «масса воды», когда речь идет о любой воде, наполняющей водоем.

Понятие «водная масса» нашло широкое применение в океанологии. В практику океанологических исследований оно впервые было введено Геланд-Гансеном (Helland-Hansen, 1912), а затем сформулировано А. Дефантом (Defant, 1961). По аналогии с понятием «воздушная масса» А. Де-

фант под водной массой подразумевал однородные ограниченные или неограниченные водные объемы, характеризующиеся вполне определенными, более или менее постоянными физическими или химическими свойствами. Однако формулировка А. Дефанта не является полной, так как в ней отсутствует указание на географический характер, биологические особенности и не используется характеристика динамики вод.

Более полное определение понятия «водная масса» дано В. К. Агеноровым (1944а). Под водной массой В. К. Агеноров подразумевает такую достаточно большую массу воды, характеристики которой, формируемые климатическими и гидрологическими условиями, или совсем не меняются в пространстве, или меняются так, что градиенты их остаются постоянными. Для установления определенной физической и химической характеристики той или иной водной массы с учетом ее биологических особенностей В. К. Агеноров выделяет водные массы I и II рода. Водные массы, у которых градиент гидрологических характеристик в пространстве равен или близок к нулю, относятся им к водным массам I рода. Водные же массы с градиентом, не равным нулю, но постоянным, названы водными массами II рода.

Дальнейшее развитие этот вопрос получил в работах А. А. Добровольского (1948, 1961), которому принадлежит и наиболее современное полное определение понятия «водная масса». Согласно этому определению: «Водной массой следует называть некоторый, сравнительно большой объем воды, формирующийся в определенном районе Мирового океана — очаге, источнике этой массы, — обладающий в течение длительного времени почти постоянным и непрерывным распределением физических, химических и биологических характеристик, составляющих единый комплекс, и распространяющихся как одно единое целое» (Добровольский, 1961, стр. 12). Такое определение дает возможность характеризовать водную массу некоторыми численными показателями, или индексами, представляющими собой величины значений физических, химических и других характеристик.

При изучении океанологических процессов исследователю приходится иметь дело с большим количеством цифр, характеризующих свойства вод. Обычно в процессе обобщения материалов пользуются арифметическим осреднением во времени и пространстве, но в силу неоднородности ряда используемых цифр сопоставление результатов, полученных путем арифметического осреднения, весьма затруднительно и часто носит формальный характер. Обобщение же конкретных цифровых материалов, характеризующих свойства вод, исходя из формулировки понятия «водная масса» можно провести, осредняя их с учетом особенностей рассматриваемого объема воды, и тем самым выявить основные закономерности формирования, размещения и взаимодействия вод океана. В результате такого осреднения характеристик каждая водная масса будет определяться какими-то значениями этих характеристик, из которых можно выделить наиболее свойственные именно данной водной массе. Эти показатели и будут лучше всего характеризовать водную массу, тогда как остальные, менее характерные и более изменчивые, служат дополнением к основным признакам.

Изучением водных масс Мирового океана занимались многие исследователи. Наиболее обстоятельные исследования водных масс Северной Атлантики были выполнены Гелланд-Ганzenом и Хансеном (Helland-Hansen a. Nansen, 1926) и Якобсеном (Jacobsen, 1929), Индийского океана и южной части Тихого океана — Хельге Томсеном (Thomsen, 1935), водной массы стратосферы всего Атлантического океана — Георгом Вюстом (Wüst, 1935), вод западной части Северной Атлантики — К. Айсленом (Iselin, 1936), экваториальной Атлантики — Р. Монтгомери (Montgomery,

1958), водных масс северной части Тихого океана — А. Д. Добровольским (1948), водных масс центральной части Арктического бассейна — В. Т. Тимофеевым (1963) и, наконец, типов вод всего Мирового океана — Х. Свердрупом (Sverdrup a. other, 1942) и А. Дефантом (Defant, 1961). Не останавливаясь подробно на описании водных масс отдельных районов Мирового океана и их характеристиках, поскольку это не входит в задачу настоящей работы, мы отметим лишь некоторые принципиальные моменты, которые могут быть использованы при исследовании водных масс континентальных водоемов.

Исследование водных масс Мирового океана открывает большие возможности для установления комплексных взаимосвязей не только в структуре вод, его наполняющих, но и способствует изучению динамического теплового и химического взаимодействия океана и атмосферы, широким географическим обобщениям при изучении ряда проблем, связанных с Мировым океаном, поэтому продолжает оставаться в центре внимания исследователей различных стран. Об этом свидетельствует обширная литература по водным массам. Среди работ, появившихся за последние годы, одни посвящены общим особенностям структуры вод Мирового океана (Groen, 1961; Степанов, 1962, 1965; Gharnok, 1962; Wüst, 1965), другие — их характеристике и описанию методических вопросов.

В результате региональных исследований получены сведения о водных массах экваториальной части Атлантического океана (Бубнов, Косарев, 1964; Косарев, 1966), выявлены особенности северо-исландских вод (Stefansson, 1962) и водных масс Ново-Шетландского шельфа (Брянцев, 1963), Норвежского моря и северо-восточной части Атлантического океана. Предпринята попытка районировать южную половину Северной Атлантики по принципу сходства в структуре водных масс (Тюряков, Захарченко, 1965).

Появилась серия работ по водным массам окраинных морей Атлантического океана. Так, водная масса средней и южной части Балтийского моря, особенности ее циркуляции в связи с атмосферными процессами освещены в работах Боичика (Baczyk, 1966). Исследованы водные массы Средиземного моря (Овчинников, 1965) и условия формирования глубинных вод в нем (Овчинников, Плахин, 1965; Плахин, 1965). Институтом океанографии и рыбного хозяйства в лаборатории физической океанографии Национального музея истории природы (Югославия) выполнены обстоятельные исследования водных масс Адриатического моря (Zogegatmand, 1963). Дана характеристика водных масс внутренних морей — Черного (Новицкий, 1964; Большаков и др., 1964) и Каспийского (Косарев, 1962).

В послевоенные годы широко развернулись исследования водных масс Тихого и Индийского океанов. Среди них особое место занимают работы советских ученых. Изучение структуры вод Тихого океана, начатое А. Д. Добровольским и П. В. Ушаковым (1949), было продолжено А. К. Леоновым (1959, 1960). Значительный вклад в изучение данного вопроса и особенно водных масс Охотского моря и прилегающей части Тихого океана внесен В. А. Бурковым (1958, 1961) и К. В. Морошкиным (1955, 1966). В результате этих исследований выявлены основные особенности водных масс в указанных районах и установлены границы отдельных разновидностей вод. Анализ экстремальных характеристик водных масс позволил проследить за их изменением во времени и пространстве. Подобные исследования для Японского моря выполнены М. А. Радзиховской (1961). Продолжается изучение структуры вод и самого океана (Леонтьева, 1966; Wyrski, 1962). Все это позволило вычислить объемные соотношения основных водных масс в отдельных частях Тихого океана (Радзиховская, 1965; Караваева и Радзиховская, 1965).

Исследования данного направления распространились и на Индийский океан. Уже в 1959 г. появились сведения о водных массах юго-восточной части Аравийского моря (Ramasystry, 1959). Еще ранее были начаты исследования водных масс юго-восточной части Индийского океана (Rochford, 1942), которые продолжают и в настоящее время, в результате чего удалось обстоятельно изучить водные массы и динамику их в Тасмановом и Коралловом морях, в море Банда и в прибрежных водах Австралии (Old, 1962; Rotschi, 1963; Rochford, 1964, 1966). Исследованиями водных масс были охвачены Арктический бассейн (Никифоров и др., 1966) и антарктические воды (Фомичев, 1965).

Широкий круг вопросов, связанных с изучением водных масс морей и океанов, потребовал усовершенствования существующих и разработки новых методов выделения водных масс (Берникова, 1960; Дубровин, 1965; Мамаев, 1965).

Из обзора океанологической литературы видно, что вопрос о водных массах морей и океанов, реальность существования которых в настоящее время не вызывает сомнений (Самойленко, 1965), о их происхождении, расположении, трансформации и сезонной динамике еще окончательно не решен и требует проведения дальнейших исследований.

Впервые термин «водная масса» в значении некоторой индивидуальности с характерным только для нее комплексом физико-химических и биологических показателей применительно к пресноводным водоемам был использован Г. Ю. Верещагиным (1927, 1936). Обобщив многолетние наблюдения над температурой и отчасти гидрохимическими особенностями вод Байкала, Г. Ю. Верещагин расчленил объем воды, наполняющий озеро, по вертикали на ряд зон. Каждая из этих зон имеет свою определенную водную массу с присущими только ей физическими и химическими свойствами. Расчленяя воды Байкала на ряд зон, Г. Ю. Верещагин четко отличал понятие «водная масса» от массы воды, наполняющей озеро. Это хорошо видно хотя бы из определения озерных течений, которые, по его мнению, представляют собой «перемещение в горизонтальном или вертикальном направлении водных масс, при котором данная водная масса сохраняет в основном все свои физико-химические особенности в течение более или менее продолжительного времени» (Верещагин, 1936, стр. 1208). Предложенная им схема вертикальной зональности вод Байкала, насколько нам известно, представляет собой первую попытку выделения водных масс в большом континентальном водоеме, но она не лишена недостатков. Эти недостатки, касающиеся, в частности, температурного режима, позднее были подробно рассмотрены Л. Л. Россолимо (1957), а химизма вод — К. К. Вотинцевым (1961). Тем не менее предложения Г. Ю. Верещагина об использовании термических и некоторых гидрохимических показателей для выделения водных масс в континентальных водоемах и прежде всего в больших озерах имеют важное значение для изучения структуры вод пресных водоемов. Идеи Г. Ю. Верещагина получили развитие в работах исследователей, занимавшихся вопросами зональности вод Байкала, в частности, в работах В. А. Толмачева (1957) и К. К. Вотинцева (1961).

Изучению водных масс и их динамики большое внимание уделяли американские и канадские ученые при комплексных исследованиях Великих Озер. Так, Эйерс и другие (Ayers и др., 1956) подробно описали водные массы оз. Гурон, а несколько позже оз. Мичиган (Ayers и др., 1958). Подробное изучение гидрологии оз. Онтарио выполнено Мортеном и Розенбергом (Morton and Rosenberg, 1959). Общая характеристика циркуляции вод в Великих Озерах описана Эйерсом (Ayers, 1962).

С. Д. Муравейский (1946) связывал формирование водных масс континентальных водоемов с процессом стока. Он считал, что в основе каждого гидрологического явления лежит перенос водных масс, который представ-

ляет собой не что иное, как их взаимообмен. При этом каждой водной массе присущи свои определенные свойства.

Таким образом, понятие «водная масса» в смысловом определении А. Д. Добровольского применимо не только к морям и океанам, но и к большим пресным озерам. Распределение некоторых гидрологических и гидрохимических показателей позволяет выделить в них водные массы, обладающие определенными физическими и химическими свойствами.

За последние десятилетия во всех странах и особенно в СССР были созданы крупнейшие искусственные водоемы-водохранилища (Авакян и Шарапов, 1962). Большая акватория водохранилищ, значительные участки рек с различным гидрологическим и гидрохимическим режимом в зоне подпора, замедленный водообмен, особенности ветрового перемешивания и поступления грунтовых вод в разных частях водохранилищ дают основание предполагать наличие различных водных масс в пределах этих водоемов. Водохранилища питаются водами основной реки (а иногда и нескольких, как Рыбинское) и водами боковой приточности. Физические и химические характеристики вод источников, питающих водохранилище, часто существенно различаются между собой, поэтому естественно, что, поступая в водоем замедленного водообмена, эти воды в определенных районах более или менее продолжительное время сохраняют свои свойства и представляют в водоеме обособленные водные массы.

Такое предположение вполне допустимо, так как в речных условиях два водных потока с резко отличными свойствами не перемешиваются в месте их слияния и продолжительное время сохраняют свои свойства. Это хорошо показано на примере Волги и ее притоков Г. И. Долговым (1928, 1954), А. А. Горюновым (1936), Н. А. Быковым (1940), А. А. Зениным (1961) и др. Подобная картина наблюдается также и в Амазонке ниже устья Рио-Негро, где на протяжении более 100 км сохраняются два обособленных потока, резко различающиеся по своим свойствам, хотя на границе их прослеживается интенсивное вихреобразование (Gessner, 1960).

Еще более генетически разнородные воды обнаруживаются при зарегулировании стока реки и образовании водохранилищ. Так, исследуя изменения химического состава воды Волги в связи с образованием Горьковского и Кузнецкого водохранилищ, А. А. Зенин (1961) пришел к выводу, что воды обоих водохранилищ и особенно Волги ниже устья Оки по химическому составу неоднородны. Более минерализованная окская вода на всем протяжении от устья Оки до устья Суры располагается у правого берега и четко отличается от волжской. Полное смешение окской и волжской вод происходит только через несколько десятков километров и зависит от скорости потоков, соотношения их водности, рельефа дна, конфигурации берегов и ряда других причин. Поскольку скорости течения в водохранилищах значительно ниже, чем в реке, а рельеф дна и конфигурация берегов намного сложнее, то смешение водных масс в них будет происходить еще медленнее.

На наличие водных масс различного происхождения в водохранилищах впервые обратил внимание М. А. Фортунатов (1959). Изучая степень окрашенности вод и характер ее изменения, а также прозрачность воды, он выявил наличие водных масс, показал их распределение в Рыбинском водохранилище и высказал соображения об использовании этих показателей для изучения трансформации вод в водоеме замедленного водообмена. Несколько позже Н. М. Казаровец (1960), применяя кондуктометрический метод, показала, что даже в навигационный период, когда водоем подвержен интенсивному ветровому перемешиванию, в Рыбинском водохранилище хорошо выделяются водные массы различного происхождения.

Более детальные исследования химических и физических характеристик вод Рыбинского водохранилища позволили нам установить, что вод-

ные массы различного происхождения отчетливо прослеживаются в нем в течение всего года (Рыбопромысловый атлас Рыбинского водохранилища, 1963; Буторин, 1964, 1965а, 1965б; Ершова, 1962, 1965). Воды различного происхождения располагаются в Рыбинском водохранилище крупными массами и заполняют вполне определенные районы. В отдельные сезоны существенные различия между водными массами в Рыбинском водохранилище хорошо прослеживаются даже на ограниченных участках водоема. Так, на волжском участке жесткая вода, двигаясь по старому руслу Волги, заполняет также значительную часть правобережной поймы. На левую пойму эта вода практически не распространяется. Переваливая в придонном слое через водораздел между Волгой и Суткой, она заполняет старое русло Сутки и не выходит за его пределы. От этого русла вся левобережная пойма занята мягкими водами неволжского происхождения. Наиболее резкое изменение всех показателей, использованных для выделения водных масс, отмечается на водоразделе между Волгой и Суткой и указывает на существование в этом месте границы между водными массами (Буторин и Бакулин, 1963).

Подобные явления наблюдаются и в других водохранилищах. Исследуя по ряду физико-химических показателей воды, поступающие в Горьковское водохранилище, К. К. Эдельштейн (1965а, 1965б) пришел к выводу, что сформировавшиеся в одинаковых физико-географических условиях, воды имеют устойчивый комплекс физических и химических показателей, который позволяет выделить в Горьковском водохранилище отдельные водные массы, приуроченные к определенным районам водоема.

Несмотря на то что при изучении континентальных водоемов многие исследователи уже давно пользуются понятием «водная масса» именно в смысловом значении, близком к определению А. Д. Добровольского, до последнего времени специальных исследований в этом направлении, кроме поставленных в лаборатории гидрологии Института биологии внутренних вод АН СССР, не ведется. Большинство авторов, говоря о водных массах пресных водоемов, ограничивается общими суждениями о них. Приводя некоторые характеристики водных масс, наполняющих тот или иной водоем, они не выделяют их разновидностей, реально существующих в условиях водоема. С нашей точки зрения, для того чтобы сделать это, необходимо прежде всего дать более или менее полное определение понятия «водная масса» в отношении пресных водоемов.

Учитывая специфические особенности водоемов суши, нельзя механически переносить существующее в океанологии определение «водной массы» на эти водоемы хотя бы потому, что очаги, или источники формирования их совершенно различны. Если океанические водные массы формируются в океане, то водные массы континентальных водоемов обычно формируются на водосборе бассейна и при этом в значительной степени определяются его природными условиями. Кроме того, климатические условия суши обуславливают более резкие по сравнению с океаном изменения показателей водных масс пресных водоемов в годовом цикле. Исходя из этих соображений понятие «водная масса» для континентальных водоемов следует сформулировать так: «водной массой пресных водоемов можно назвать некоторый сравнительно большой объем воды, формирующийся в определенных географических условиях бассейна или в самом водоеме, обладающий в течение каждой фазы гидрологического режима почти постоянными величинами и относительно равномерным распределением физических, химических и биологических характеристик, составляющих единый комплекс и распространяющийся как одно единое целое» (Буторин, 1965а, стр. 8).

Естественно, что понятие «водная масса» применительно к пресным водоемам, как и в океанологии, является в известной степени условным.

Попытка сочетать в нем количественные и качественные стороны единого процесса стока в значительной мере будет способствовать изучению закономерностей режима водоемов замедленного водообмена и прежде всего водохранилищ. В водохранилищах особенно четко проявляется взаимосвязь этих двух сторон стока. В них наиболее хорошо можно проследить за распределением, перемещением и трансформацией различных по составу и объему вод, питающих водохранилища.

Поскольку с водными массами в водоеме переносится тепло, растворенные газы и соли, взвешенные органические и неорганические вещества, то данные о них могут служить основой при расчетах водного, теплового и химического баланса водохранилищ. Изучение перемещения водных масс в водохранилищах позволит косвенным путем решить проблему динамики вод в водоемах замедленного водообмена. Исследования водных масс будут способствовать разработке принципов прогнозирования качества воды в водохранилищах и на их отдельных участках, а также позволят конкретнее подойти к решению вопроса о географическом районировании озер и водохранилищ и их классификации. Исследование водных масс необходимо и для познания биологических процессов, протекающих в водоемах, так как последние являются средой обитания водных животных и растений.

Система волжских водохранилищ является весьма удобным объектом для исследования проблемы водных масс в пресных водоемах. Крупные водохранилища волжского каскада представляют своего рода большие естественные лаборатории, и изучение водных масс в них можно вести при различных режимных условиях (в случае необходимости и при любых заданных). Наличие в каскаде водохранилищ различного типа позволяет вести исследования при одинаковых климатических условиях в водоемах, резко отличных по режиму.

Изучение режима водохранилищ через посредство водных масс является новым направлением в лимнологии. Оно позволит глубже раскрыть закономерности и особенности процессов, протекающих в этих своеобразных водоемах. Теоретическому обоснованию и разработке данного направления и посвящен настоящий раздел работы.

Показатели водных масс пресных водоемов

При выделении водных масс в пресных водоемах, как и в морях, обычно за основу берутся физические и химические характеристики вод, такие как температура, электропроводность, цвет, прозрачность и отчасти мутность воды, неоднородность химического состава воды, и в частности щелочность, жесткость, содержание гидрокарбонатов, ионов кальция, магния, кремния, а в отдельных случаях концентрация водородных ионов (рН) и содержание растворенного кислорода.

Физические показатели

Температура воды. Из всех показателей для выделения водных масс в пресных водоемах наиболее часто используется температура воды. Анализ горизонтального и вертикального распределения температуры позволяет наметить в первом приближении границы водных масс, определить положение наибольших и наименьших градиентов. Иногда температура воды служит основным показателем водных масс (Верещагин, 1927, 1936), но чаще в комплексе с другими показателями (Ауерс и др., 1956, 1958; Рутковский, 1958; Буторин, 1964, 1965; Эдельштейн, 1965а, 1965б).

Электропроводность воды. Хорошим показателем неоднородности химического состава пресных вод является их электропроводность. Одним из первых применил этот показатель Мюллер (Müller, 1901) при исследовании естественных вод. В дальнейшем систематические наблюдения над электропроводностью пресных вод проводились многими учеными. Так, Прауэниц (Prausnitz, 1908), Спитта и Плейснер (Spitta und Pleissner, 1909) установили, что по данным электропроводности можно определять характер, продолжительность и величину влияния на водные источники притока подпочвенных вод, дождей, загрязненных сточными водами и т. п. А. Г. Дорошевским и С. В. Дворжанчиком (1913) на примере р. Москвы, а Д. А. Шутовым (1926) на примере Волги были установлены сезонные колебания электропроводности и выявлены факторы, их обуславливающие. Как показатель неоднородности химического состава речных вод, электропроводность использовалась А. К. Трифоновым (1926) и Г. И. Долговым (1928).

Электропроводность оказалась весьма характерным показателем водных масс озер (Ruttner, 1915; Ауге и др., 1956, 1958) и водохранилищ (Рутковский, 1958; Зенин, 1961). Исследования Н. М. Казаровец (1960), А. А. Зенна (1961) и более поздние М. Г. Ершовой (1962), К. К. Эдельштейна (1964, 1965) и наши (Рыбопромысловый атлас Рыбинского водохранилища, 1963; Буторин, 1954, 1965а, 1965б) показали, что электропроводность воды является одним из основных показателей водных масс волжских водохранилищ.

Цвет и прозрачность воды. Сравнительно устойчивым показателем водной массы в пресноводных водоемах является цветность воды. Распределение ее по акватории водоема позволяет уже в экспедиционных условиях наметить границы водных масс и отчасти проследить их перемещение (Верещагин, 1927). Хорошим показателем для выделения водных масс служит и прозрачность воды. Данные прозрачности воды на разных глубинах позволяют судить о расслоении водной толщи и распределении водных масс по вертикали (Sauberger, 1939; Sauberger a. Ruttner, 1941).

Используя цветность и прозрачность как показатели водных масс и обработав многолетние материалы по этим показателям для Рыбинского водохранилища, М. А. Фортунатов (1959) пришел к выводу, что степень окрашенности воды и характер изменения ее, вместе с прозрачностью, являются наглядными признаками, позволяющими судить о распределении в водохранилище водных масс различного происхождения, о трансформации и перемешивании речных вод в водоеме замедленного водообмена. Степень окрашенности вод в ряде случаев служит хорошим показателем для выделения водных масс в озерах и водохранилищах при аэровизуальных наблюдениях (Фортунатов, 1959; Караушев, 1960, 1961; Широков, 1961, 1962).

На оптические показатели водных масс существенное влияние оказывает мутность вод. Этот признак иногда служит самостоятельным показателем водных масс (Янкович, 1959; Зимина, 1963). Исследуя распределение водных взвесей в Рыбинском водохранилище и их сезонное изменение, Н. А. Зимина (1963) установила, что в отдельные сезоны мутность воды может служить надежным показателем для выделения водных масс во внутренних водоемах.

Химические показатели

В качестве химических показателей для выделения водных масс в пресных водоемах отдельные исследователи используют различные характеристики. Так, Г. Ю. Верещагин (1927, 1936) при изучении зональ-

ности вод Байкала дополнительно к температуре привлекал данные содержания растворенного кислорода, свободной углекислоты и кремния. К. К. Вотинцев (1961) использовал ионный состав воды, биогенные элементы, органическое вещество и компоненты газов. Лучшими химическими индикаторами водной массы р. Селенги в озере Байкал К. К. Вотинцев и др. (1963) считают концентрацию гидрокарбонатных ионов и кремния.

Американские исследователи при изучении водных масс Великих Озер учитывали содержание ионов кальция, магния и кремния (Ayers и др., 1956, 1958).

К. К. Эдельштейн (1965а) при исследовании водных масс Горьковского водохранилища из химических показателей использовал щелочность, общую жесткость, сумму сильных кислот, концентрацию водородных ионов (рН) и содержание растворенного кислорода. Наиболее консервативными показателями он считает содержание гидрокарбонатных ионов и жесткость. Эти показатели практически не меняют своих значений за время пребывания водной массы в водохранилище, и поэтому являются хорошими индикаторами не только ее происхождения, но и трансформации за счет смешения с другими водными массами. Концентрация водородных ионов и содержание растворенного кислорода подвержены сильным изменениям в зависимости от гидрометеорологических условий, биологических и биохимических процессов и ряда других факторов. Поэтому вместе с суммой сильных кислот они не являются характерными показателями водных масс для данного водоема.

Ранее К. К. Эдельштейна к такому же выводу о показателях водных масс Горьковского водохранилища пришел А. А. Зенин (1961). На основании многолетних исследований Горьковского и Куйбышевского водохранилищ А. А. Зенин установил, что наилучшими химическими показателями для выделения водных масс в волжских водохранилищах являются хлоридные ионы, а затем сульфатные. Однако учитывая, что содержание хлоридных ионов в водах волжских водохранилищ и в водах боковой приточности мало и почти одинаково, а определение сульфатных ионов с достаточной точностью весьма затруднено, наиболее удобным показателем водных масс в данном случае следует считать содержание гидрокарбонатных ионов и жесткости.

Следует отметить, что между отдельными показателями водных масс в пресных водоемах существует определенная связь. Наиболее тесная обнаружена нами между электропроводностью и содержанием гидрокарбонатов (рис. 89), а также между электропроводностью и общей жесткостью (рис. 90) и выражается она в данном случае линейным уравнением.

Аналогичные результаты получены нами при выявлении подобных связей между показателями водных масс Рыбинского водохранилища. Как и в речных водах Горьковского водохранилища, наиболее тесная связь во все сезоны наблюдается между электропроводностью и содержанием гидрокарбонатов, а также между электропроводностью и общей жесткостью, между электропроводностью и содержанием ионов кальция. И, наоборот, хорошей зависимости между электропроводностью, с одной стороны, в температурой, цветностью и прозрачностью — с другой, равно как между температурой и содержанием гидрокарбонатов, цветностью и прозрачностью, не существует. Следовательно, в данном случае мы имеем дело с группой зависимых и независимых показателей: к первым относятся гидрохимические характеристики водных масс, ко вторым — физические.

Перечисленные показатели водных масс можно условно подразделить на две группы, различающиеся по степени консервативности. К наиболее консервативным в водохранилищах Верхней и Средней Волги могут быть отнесены показатели содержания гидрокарбонатов, жесткости,

электропроводности и цветности воды. Консерватизм первых двух из них определяется состоянием карбонатно-кальциевого равновесия, относительная стабильность которого в водах этих водохранилищ и их притоков связана с пониженной (по сравнению с нормальной) насыщенностью вод карбонатом кальция (Моричева, 1965). Поскольку ионы HCO_3^- , Ca и Mg 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

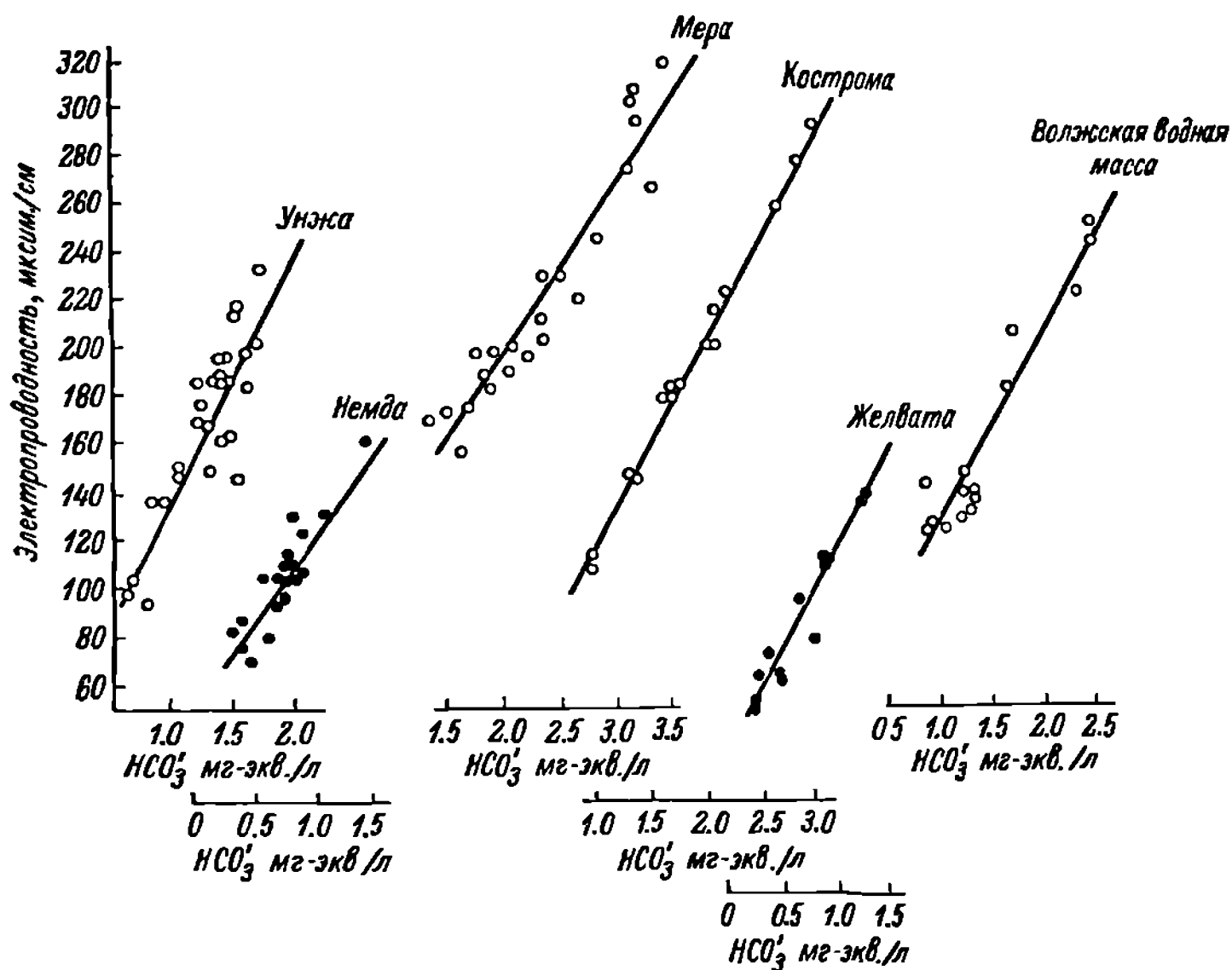


Рис. 89. Зависимость электропроводности воды от содержания гидрокарбонатов для отдельных водных масс (по К. К. Эдельштейну, 1968).

кой. Возможность применения цветности как показателя генезиса вод водохранилищ подробно обоснована М. А. Фортунатовым (1959). Таким образом, показатели первой группы практически не меняют своих значений на протяжении того времени, пока водная масса находится в водохранилище, и поэтому могут служить хорошими индикаторами ее происхождения и трансформации.

К менее консервативным показателям 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 условиями погоды, морфологией и водообменом отдельных участков водоема. Как уже указывалось, такое деление характеристик воды в значительной степени 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 показателей двух и более находящихся в водоеме водных масс невелико по сравнению с возможной ошибкой метода определения его величины, такой показатель, даже достаточно консервативный, нельзя считать пригодным для выделения водных масс. В табл. 72 приводится максимальный размах варьирования значений ряда показателей водных масс в моменты съемок Горьковского водо-

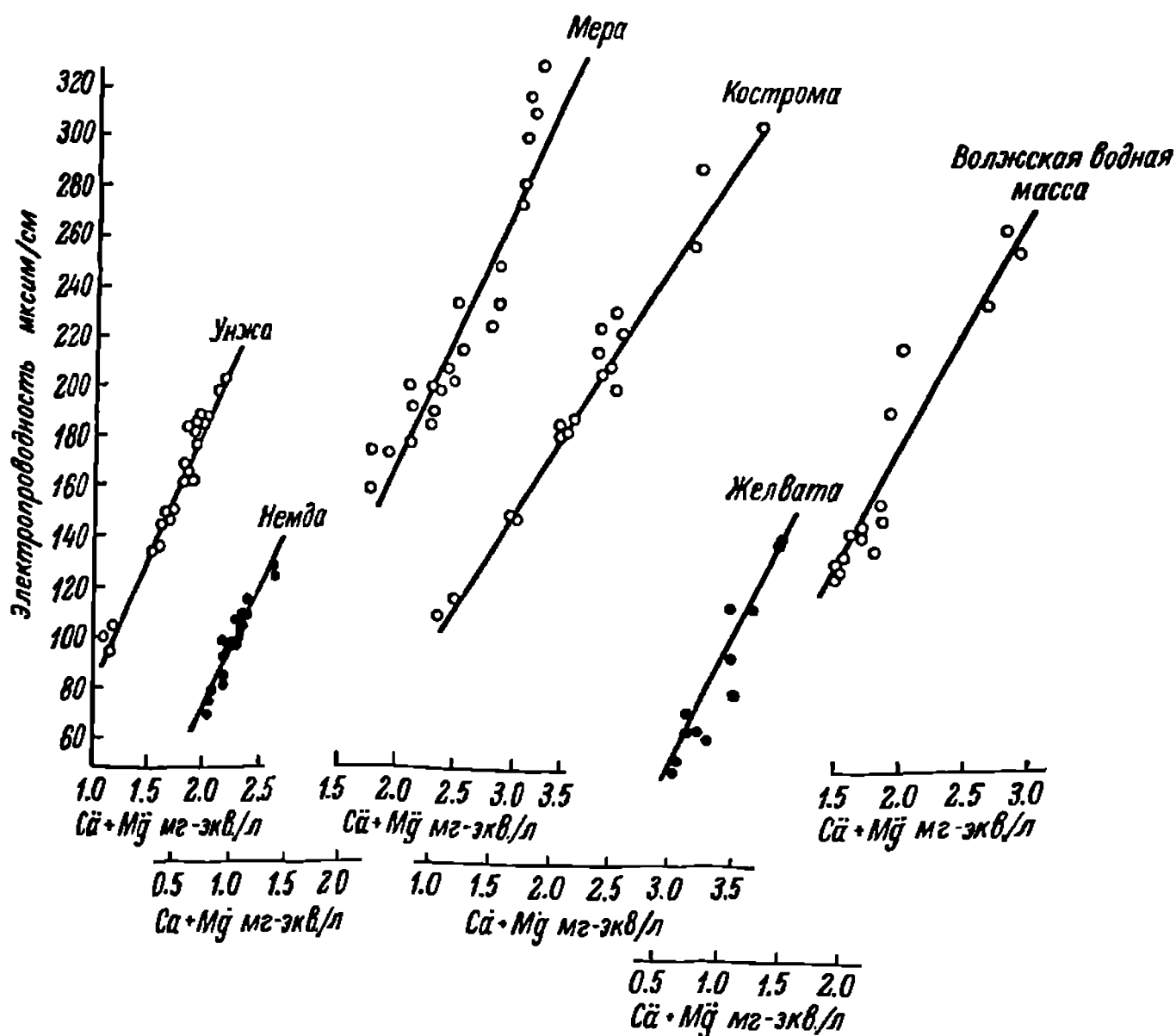


Рис. 90. Зависимость электропроводности от общей жесткости воды для отдельных водных масс (по К. К. Эдельштейну, 1968).

хранилища, средняя погрешность их определения и отношение первой величины ко второй (K). Чем больше значение K , тем показатель репрезентативней. Наименее надежными характеристиками, с рассматриваемой точки зрения, оказались прозрачность, рН и особенно сумма сильных кислот.

По комплексу гидрофизических и гидрохимических показателей, как будет показано далее, нам удалось выделить в водохранилищах волжского каскада речные водные массы и водные массы собственно водохранилищ. Так, в Рыбинском водохранилище во все сезоны отчетливо выделяются волжские, моложские, шекснинские воды и воды центральной части водоема (Рыбопромысловый атлас Рыбинского водохранилища, 1963; Вуторин, 1965а, 1965б). Однако значения основных показателей вод в различные сезоны могут существенно отличаться друг от друга. В связи с этим при анализе водных масс необходимо иметь представление о сезонной изменчивости их характеристик.

Сравнение репрезентативности показателей водных масс
Горьковского водохранилища
(по К. К. Эдельштейну, 1968)

Показатель	Максимальный размах варьирования	Средняя погрешность определения	Параметр репрезен- тативности (K)
Температура	6.9°	0.1°	69
Электропроводность	212 мксим. см	5 мксим. см	42
Общая жесткость	2.38 мг-экв. л	0.07 мг-экв. л	33
Гидрокарбонаты	2.99 мг экв л	0.10 мг-экв. л	30
Цветность	140°	5°	28
Прозрачность	160 см	10 см	16
pH	1.0	0.1	10
Сумма сильных кислот	0.71 мг-экв. л	0.09 мг-экв./л	8

Сезонная изменчивость показателей водных масс
водохранилищ

Изменения состава пресных вод во времени весьма значительны. Для района наших исследований это хорошо показано А. П. Щербаковым (1950) на примере вод Волги, Мологи и Шексны (табл. 73).

Из табл. 73 видно, что все характеристики вод указанных рек имеют значительную сезонную изменчивость. Так, наименьшая концентрация солей в водах рек отмечается во время весеннего половодья. Подобная картина прослеживается в это время и в отношении общей жесткости воды.

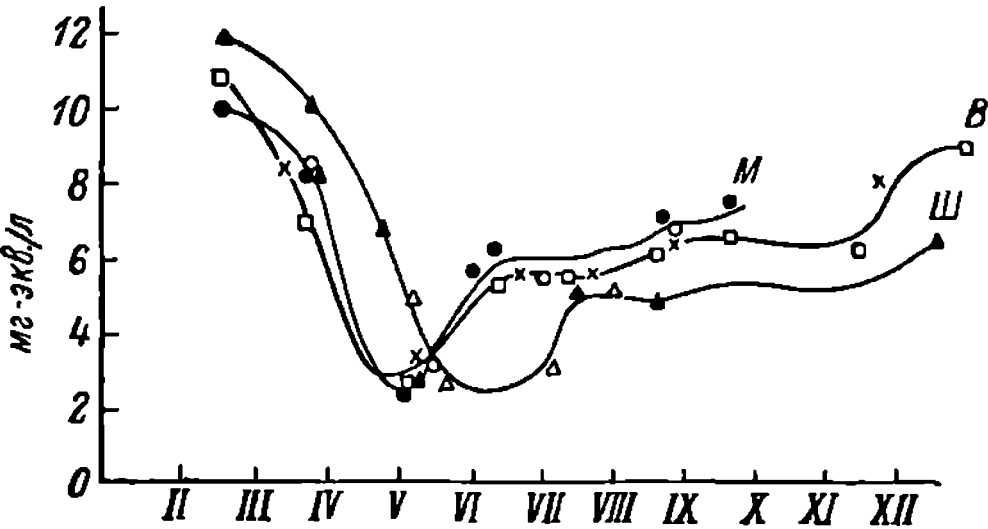


Рис. 91. Сезонные изменения общего содержания ионов
в Волге (В), Мологе (М), Шексне (Ш) (по Ф. И. Без-
леру, 1963).

Летом и осенью происходит нарастание минерализации и зимой она дости-
гает максимальных значений. Последовательность сезонного изменения
общего соотношения ионов вод этих трех рек четко выражена на рис. 91,
составленном Ф. И. Безлером (1963).

Сезонная изменчивость характеристик, принимаемых нами за пока-
затели водных масс, сохранилась и в условиях водохранилищ. Это про-
слежено нами на примере водных масс Рыбинского водохранилища. Из данных табл. 74 видно, что из года в год во время весеннего половодья
показатели речных водных масс имеют минимальные значения. Так,
электропроводность в волжской водной массе колеблется от 100 до
130 мксим./см, а в моложской и шекснинской еще ниже (рис. 92). По мере
приближения речных потоков к центральной части водоема электропровод-

Некоторые характеристики вод Волги, Мологи и Шексны
до создания водохранилища
(по А. П. Щербакову, 1950)

Дата	Температура, С	Прозрач- ность, см (по Снеллену)	Цветность, град Сг Со	Са	Mg	НСО ₃	Общая жесткость, град. (нем.)
В о л г а							
1939							
17 II	0.05	29	20	77.0	19.6	284.8	15.3
24 III	—	—	15	48.3	11.9	184.0	9.5
26 IV	—	—	66	19.3	3.7	58.5	3.6
5 V	5.4	10	83	22.6	4.9	63.9	4.1
10 VI	—	19	71	40.5	8.7	122.8	7.7
2 VII	20.5	11	58	37.9	8.6	140.4	7.3
17 VIII	21.7	13	55	46.5	11.3	170.0	9.1
13 IX	11.4	12	40	46.3	11.4	168.3	9.1
30 XII	0.00	16	23	59.7	14.9	216.9	11.8
М о л о г а							
1939							
18 II	0.0	24	35	66.2	17.2	246.8	13.3
12 III	—	—	21	51.2	13.7	187.2	10.4
14 III	—	—	16	43.8	11.1	157.8	8.7
27 III	0.05	60	20	54.5	14.7	210.5	11.0
1 IV	—	—	17	59.1	14.2	199.2	11.6
2 IV	—	—	20	62.0	14.4	208.1	12.0
6 V	7.6	14	130	17.4	4.0	53.5	3.4
29 VI	20.6	19	71	41.3	9.5	132.7	8.0
10 VII	21.0	21	70	42.5	10.3	139.7	8.3
20 VIII	21.2	24	40	43.3	11.6	151.1	8.8
21 IX	—	—	21	49.1	15.4	187.6	10.5
22 IX	10.9	37	34	49.1	13.9	173.5	10.1
22 IX	10.8	35	32	50.9	13.9	172.0	10.3
Ш е к с н а							
1939							
20 II	0.0	19	37	79.7	19.4	232.2	15.7
25 III	—	22	30	74.8	20.6	220.2	15.2
7 V	6.1	9	125	18.5	4.6	48.3	3.7
7 VII	18.2	14	88	37.1	9.4	108.7	7.4
16 VIII	21.4	10	45	29.4	7.9	98.0	5.9
30 XII	0.0	22	38	51.0	14.2	159.3	10.4

ность увеличивается в результате смешения слабоминерализованных вод Половодья с высокоминерализованными зимними водами центральной части. Так, если в районе сел. Коприно она весной обычно составляет 110—115 мксим./см, то на границе с водной массой центральной части водохранилища ее значения достигают 150—160 мксим./см. Подобная картина наблюдается и в воде моложского и шекснинского потоков. Следует, однако, отметить, что в ходе весеннего наполнения водохранилища электропроводность речных вод вообще постепенно повышается. Так, к концу весны электропроводность волжской воды увеличивается до 130—140 мксим./см.

Общая тенденция к повышению электропроводности в речных водах сохраняется и летом (в волжской водной массе она достигает 150—

200 мксим./см). Повышение минерализации отдельных водных масс протекает неодинаково. Наиболее интенсивно ее нарастание в весенне-летний период в моложской воде, поэтому летом здесь отмечается более высокая электропроводность, чем в волжской и шекснинской водных массах.

Осенью повышение электропроводности речных вод продолжается. Наиболее высокими значениями отличаются волжская и моложская

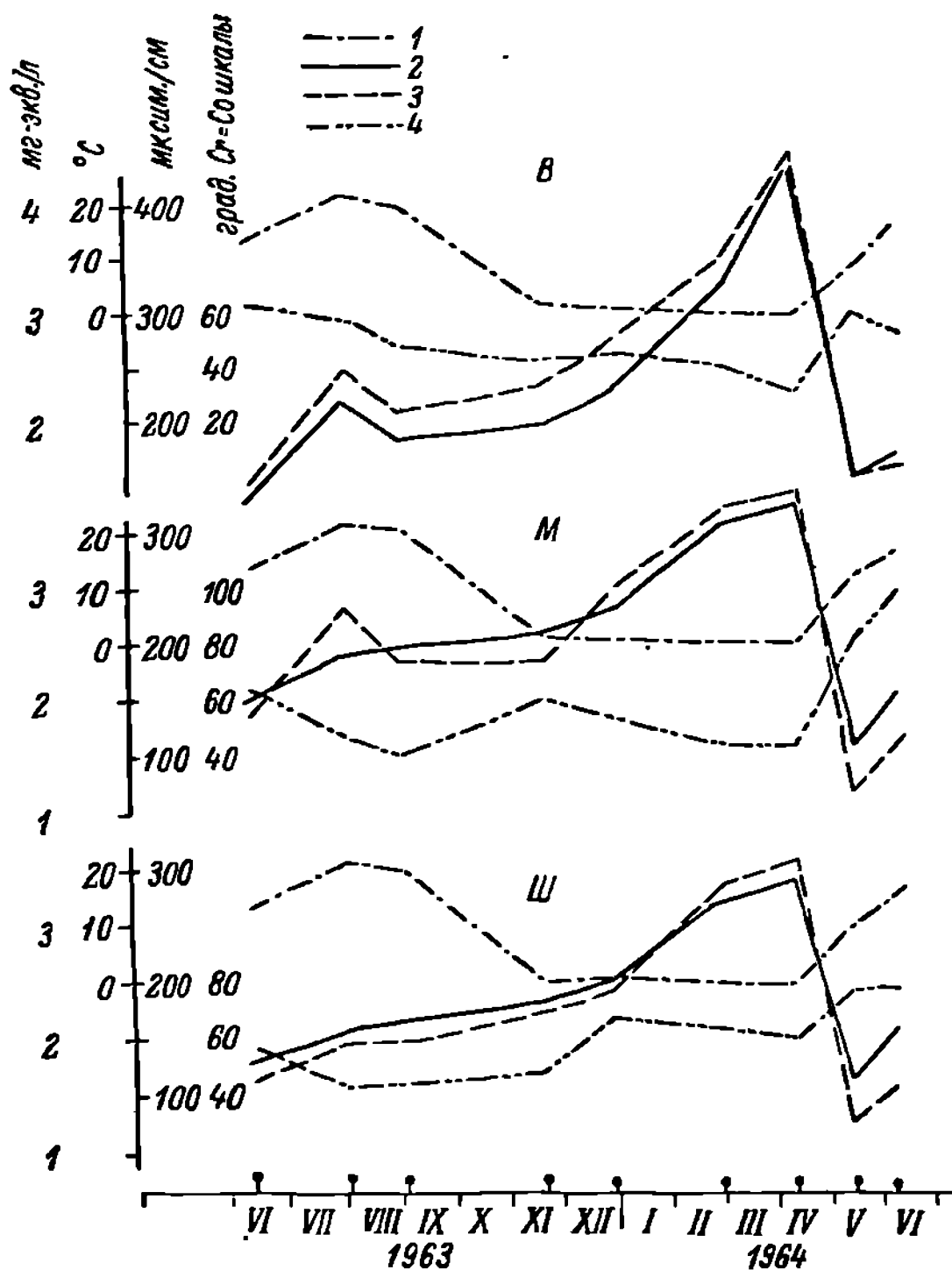


Рис. 92. Сезонное изменение характеристик волжской (В), моложской (М) и шекснинской (Ш) водных масс Рыбинского водохранилища.

1 — температура; 2 — электропроводность; 3 — жесткость; 4 — цветность.

водные массы. Электропроводность шекснинской воды хотя и увеличивается по сравнению с летом, но она заметно ниже, чем в волжской и моложской водах. Интересно отметить, что несмотря на общее повышение электропроводности речных вод осенью, по мере продвижения их к центральной части водохранилища она понижается. Таким образом, в изменении электропроводности по ходу речных потоков осенью наблюдается картина, обратная весенней.

В течение зимы электропроводность речных вод продолжает расти и к концу сезона достигает максимальных значений (см. рис. 92). Так, обычные значения электропроводности волжской водной массы в зимний период находятся в пределах 270—360 мксим./см, но в отдельных случаях достигают 450 мксим./см.

Сезонные изменения основных

Водная масса	1960						1961								I
	V	VI	VII	VII	X	XI	II	III	V	VI	VIII	X	XI	XII	

Электропровод

Волжская	109	127	—	154	233	265	214	268	118	154	174	185	187	271	300
Моложская	92	125	186	185	218	230	241	274	94	110	174	168	176	—	286
Шекснинская	84	104	145	154	172	176	262	262	142	113	140	148	—	—	—
Центральной части	236	200	—	170	160	153	210	203	218	180	156	153	151	168	174

Гидрокар

Волжская	0.90	1.10	—	1.34	2.00	2.30	1.76	2.28	0.98	1.34	1.66	1.45	1.67	2.37	2.94
Моложская	0.78	1.11	0.98	1.70	2.00	2.17	2.17	2.01	0.66	0.90	1.67	1.42	1.51	—	2.72
Шекснинская	0.62	0.79	0.91	1.36	1.38	1.40	1.91	1.93	0.90	0.80	1.48	1.13	—	—	—
Центральной части	1.82	1.78	—	1.46	1.34	1.26	1.75	1.65	1.95	1.42	1.44	1.10	1.22	1.68	1.44

Жесткость,

Волжская	1.14	1.36	—	1.98	2.57	2.69	2.54	2.82	1.50	1.85	1.94	1.92	2.09	2.82	—
Моложская	1.09	1.45	2.10	2.38	2.70	2.48	2.18	3.20	1.34	1.57	2.17	2.00	2.07	—	3.28
Шекснинская	0.97	1.12	1.70	2.16	2.24	2.03	3.28	3.30	1.82	1.54	1.46	1.89	—	—	—
Центральной части	2.36	2.06	—	2.26	1.96	1.70	2.61	2.31	2.54	2.08	1.70	1.68	1.84	1.81	2.06

Темпе

Волжская	7.9	15.2	—	22.0	10.0	3.2	0.0	0.0	8.2	16.8	20.4	9.8	2.6	0.1	0.0
Моложская	9.7	15.4	22.0	23.4	8.8	1.2	1.5	2.5	9.3	16.5	20.9	9.4	1.4	—	0.3
Шекснинская	6.2	14.4	21.7	23.2	8.5	0.1	0.9	1.3	3.0	14.2	21.1	9.8	—	—	—
Центральной части	3.9	13.3	—	23.6	9.3	1.8	1.0	1.2	2.4	14.6	20.5	10.0	0.8	0.6	1.0

Цветность,

Волжская	35	45	—	40	35	30	60	50	40	50	50	30	35	30	20
Моложская	60	60	20	35	25	30	50	50	70	90	60	75	65	—	60
Шекснинская	60	60	20	30	25	30	40	30	55	75	50	60	—	—	—
Центральной части	25	20	—	20	30	30	35	45	40	25	45	40	35	40	50

Прозрач

Волжская	0.1	1.5	—	1.0	1.2	2.0	—	—	1.2	1.3	1.3	—	1.1	—	—
Моложская	0.9	1.3	0.7	0.8	1.8	1.7	—	—	1.1	1.2	1.0	1.4	—	—	—
Шекснинская	1.0	1.4	1.1	1.0	1.7	1.2	—	—	1.1	1.2	1.2	1.4	—	—	—
Центральной части	1.3	2.1	—	1.8	1.1	1.0	—	—	1.7	2.1	1.4	1.4	1.4	—	—

Годовой ход содержания гидрокарбонатов и жесткости в речных водных массах повторяет годовой ход электропроводности (см. рис. 92). Минимальное содержание гидрокарбонатов в этих водах наблюдается весной. Летом содержание их увеличивается, причем наиболее интенсивно в моложской водной массе. Шекснинская вода, напротив, характеризуется пониженным содержанием гидрокарбонатов: в течение всего навигационного периода оно находится в пределах 1.50 мг-экв./л. Осенью содержание гидрокарбонатов в речных водах продолжает увеличиваться и достигает максимальных значений в конце подледного периода.

Существенные изменения в течение года наблюдаются и в величинах жесткости вод (см. рис. 92). Наименьшую жесткость речные воды имеют

Таблица 74

характеристик вод Рыбинского водохранилища

1962				1963							1964						
IV	V	VIII	XI	II	IV	VI	VIII	IX	XI	XII	II	IV	V	VI	VIII	XI	
НОСТЬ, МКСИМ. СМ																	
356	118	196	238	272	340	130	218	187	200	232	327	440	131	172	165	191	
290	88	168	188	248	—	148	192	200	210	231	310	325	112	156	178	237	
—	86	136	147	234	—	132	160	168	184	206	275	—	118	160	151	202	
146	192	136	138	183	256	180	168	162	161	179	204	255	284	248	186	169	
БОИ АТЫ, МГ-ЭКВ./Л																	
3.35	0.81	1.77	2.17	—	3.22	1.12	1.64	1.76	1.91	2.29	3.07	—	1.06	1.24	1.49	1.63	
2.74	0.74	1.53	1.91	—	—	1.45	1.65	2.00	1.97	2.16	3.10	3.04	0.90	1.20	1.60	2.18	
—	0.64	1.16	1.30	—	—	1.24	1.41	1.46	1.53	1.73	2.22	—	0.81	1.07	1.31	1.71	
1.18	1.60	1.16	1.21	—	2.99	1.57	1.38	1.46	1.48	1.67	1.95	—	2.56	1.94	1.61	1.44	
МГ-ЭКВ./Л																	
3.78	1.36	3.06	2.90	—	2.15	1.42	2.44	2.11	2.34	2.74	3.50	4.49	1.50	1.58	1.84	2.11	
3.66	1.18	3.04	2.52	—	—	1.85	2.82	2.31	2.34	2.98	3.74	3.87	1.18	1.61	2.06	2.82	
—	1.10	2.78	2.18	—	—	1.66	1.98	2.00	2.28	2.46	3.41	—	1.32	1.59	1.78	2.16	
1.78	2.20	2.57	2.15	—	2.32	2.06	2.38	1.95	2.06	2.27	2.28	2.40	3.02	2.41	2.08	1.91	
РАТУРА, °С																	
0.0	9.1	17.2	5.4	0.1	0.1	13.4	21.4	20.0	1.4	0.4	0.2	0.0	7.9	15.4	19.8	6.1	
0.2	9.6	18.1	3.6	0.4	—	13.4	21.3	20.6	0.9	0.4	0.4	0.4	12.2	16.2	19.4	5.3	
—	8.6	16.8	3.6	0.8	—	13.0	21.2	20.3	0.4	1.4	0.6	0.0	10.0	15.3	19.2	4.9	
0.6	5.2	18.2	4.3	0.5	0.4	12.9	21.4	20.0	1.2	0.6	0.6	0.5	5.6	15.0	19.7	5.0	
ГРАД. Сг=Со																	
30	60	70	55	—	40	65	60	50	40	45	40	30	60	50	40	35	
50	85	60	80	—	—	65	45	40	60	80	45	45	85	100	55	30	
—	75	60	70	—	—	60	45	45	50	70	65	60	80	80	50	35	
35	55	60	55	—	50	66	40	40	55	45	45	40	35	40	40	35	
НОСТЬ, М																	
—	0.9	0.9	1.3	—	—	1.0	1.2	1.2	—	—	—	—	1.2	1.0	1.2	—	
—	1.1	1.2	1.2	—	—	1.1	1.2	1.5	1.0	—	—	—	1.1	1.0	1.1	1.5	
—	1.0	1.0	0.9	—	—	1.0	1.0	1.2	—	—	—	—	0.9	1.0	0.9	1.3	
—	1.2	1.4	1.0	—	—	0.9	1.8	1.8	—	—	—	—	2.0	1.8	1.8	0.8	

в весенний период — обычно ниже 2 мг-экв./л (см. табл. 74). Нарастание минерализации речных вод в летний период сопровождается некоторым повышением их жесткости. От лета к осени жесткость волжской и моложской вод продолжает увеличиваться, а в шекснинской практически не меняется. В осенне-зимний период она систематически повышается до 2.40—3.35 мг-экв./л в шекснинской воде и до 3.74—4.47 мг-экв./л волжской.

Еще более четко прослеживаются сезонные изменения в температуре водных масс. Температура речных вод имеет обычный годовой ход, характерный для водоемов данной климатической зоны (см. рис. 92). Значения ее для отдельных сезонов года приведены в табл. 74. Из нее видно, что

шексинская водная масса характеризуется более низкими температурами по сравнению с волжской и моложской водами, а годовой ход температуры моложских вод несколько сдвинут относительно остальных: прогрев их весной начинается раньше и идет интенсивнее. Обратная картина наблюдается в период осеннего охлаждения. Сезонные изменения температуры воды в водохранилищах различного типа подробно рассмотрены в одном из предыдущих разделов работы.

Некоторые изменения в течение года претерпевает и цветность вод в водохранилище. В отличие от других показателей водных масс значения цветности речных вод в водохранилище весной относительно высокие: в волжской и шексинской водах они составляют примерно $60-70^\circ$, а в моложской достигают даже 100° . Летом цветность вод заметно уменьшается и, как правило, не превышает 30° . Примерно такой же остается она и осенью, а зимой снова несколько увеличивается (см. рис. 92).

Обратная картина наблюдается в изменениях прозрачности. Прозрачность речных вод имеет наименьшие значения в весенний период, а мак-

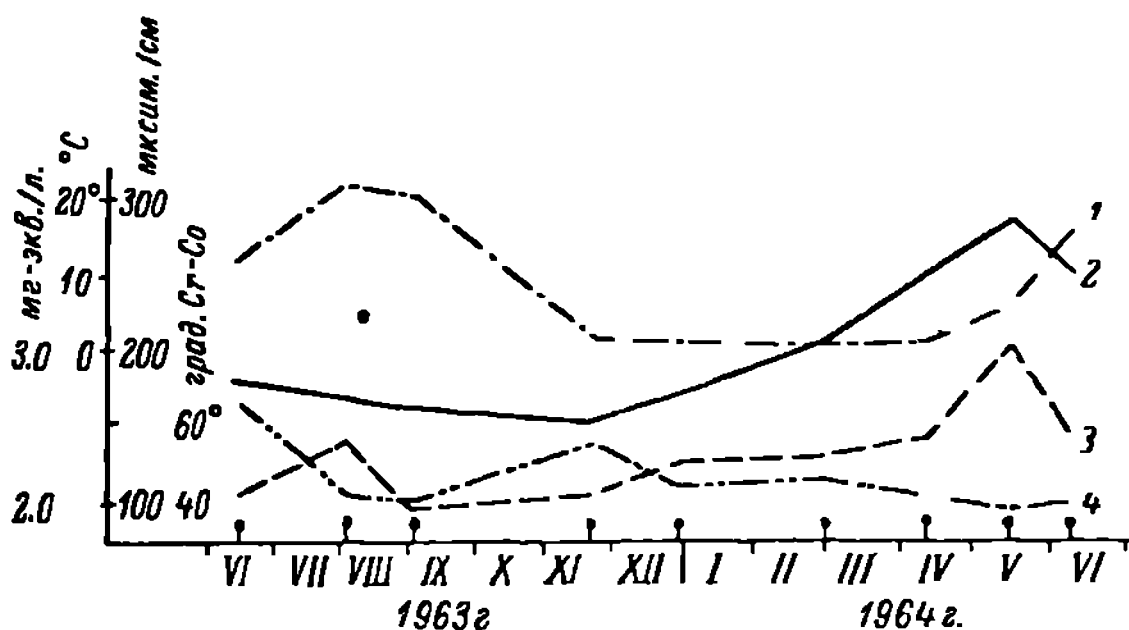


Рис. 93. Сезонные изменения характеристик водной массы центральной части Рыбинского водохранилища.

Условные обозначения те же, что и на рис. 92.

симальные обычно зимой. Вообще прозрачность вод водохранилища колеблется в годовом цикле в широких пределах. Наши наблюдения во время синхронных съемок показали, что только в навигационный период она изменяется от 60 до 270 см.

Годовой ход показателей водной массы центральной части водохранилища существенно отличается от такового в речных водных массах (рис. 93). Прежде всего очень высока весной электропроводность — обычно она колеблется от 150 до 180 мксим./см во фронтальных зонах и до 270—280 мксим./см в ее ядре. В процессе наполнения водохранилища высокоминерализованная водная масса центральной части постепенно разбавляется паводковыми водами, а также за счет таяния льда и выносится в нижний бьеф Рыбинского гидроузла. В связи с этим ее электропроводность в отличие от речных водных масс в летне-осенний период систематически понижается и летом колеблется в пределах 160—170 мксим./см, а осенью составляет 140—160 мксим./см. Таким образом, минимум в годовом ходе электропроводности водной массы собственно водохранилища наблюдается осенью. В зимний период вследствие поступления высокоминерализованных речных вод электропроводность данной водной массы снова повышается и к концу зимы достигает 200 мксим./см и выше.

Годовой ход содержания гидрокарбонатов и жесткости такой же, как электропроводности. Максимальное содержание гидрокарбонатов в водной массе собственно водохранилища наблюдается весной. В летне-осенний

период оно постепенно падает и осенью почти в два раза меньше, чем весной. Зимой содержание гидрокарбонатов в центральной части водохранилища снова увеличивается. Жесткость водной массы водохранилища весной в два раза выше, чем в речных водных массах, летом близка к их значениям, а осенью и зимой несколько ниже. Как правило, она близка или превышает 2 мг-экв./л.

Прогрев водной массы центральной части водохранилища идет медленнее и температура ее весной значительно ниже окружающих водных масс. Осенью наблюдается обратная картина. Цветность ее в течение всего года низкая. Минимальная цветность наблюдается летом ($15-25^{\circ}$), осенью она повышается до $30-35^{\circ}$. Водная масса собственно водохранилища отличается высокой прозрачностью. Пределы колебаний ее прозрачности в навигационный период — от 60 до 270 см, а наиболее характерные величины — 100—200 см. При отсутствии ледяного покрова прозрачность данной водной массы наиболее высока летом (170—190 см), осенью она уменьшается до 100—110 см.

Таким образом, на примере Рыбинского водохранилища видно, что основные показатели водных масс пресных водоемов существенно изменяются по сезонам. Это касается прежде всего солевого состава, температуры, цветности и прозрачности воды, характер и величина сезонных изменений показателей водных масс в континентальных водоемах позволяют, с одной стороны, лучше понять структуру и закономерности формирования этих масс, но с другой — вносят определенные затруднения в методы выделения их.

Методы выделения водных масс в волжских водохранилищах

При изучении распределения, перемещения и трансформации водных масс в водохранилищах существенно важным является выбор принципа их выделения. В отдельные сезоны для некоторых водоемов удается установить распределение водных масс даже по одному-двум характерным показателям, например по карбонатам и температуре (Schmalz, 1932), мутности (Atkins, Jenkins, 1955; Зимина, 1963), сульфатам (Schräder, 1956), цветности (Фортунатов, 1959; Hopkins, 1961) и электропроводности (Казаровец, 1960; Зенин, 1961; Ершова, 1962). Однако такая возможность выделения водных масс в континентальных водоемах явление весьма редкое. До сих пор не установлен единый показатель или несколько вполне определенных показателей, которые были бы общими для всех пресных водоемов и позволили бы непосредственно характеризовать их водные массы. Поскольку понятие «водная масса» подразумевает не только физические и химические особенности среды, а также физико-географический фактор и динамическое состояние вод, то наиболее целесообразно выделять водные массы в пресных водоемах, как и в морских, исходя из анализа физико-химических и биологических условий с учетом особенностей режима водоемов.

С этих позиций нами и разрабатывалась методика выделения водных масс в волжских водохранилищах. В основу ее положены широко применяемые в океанологии косвенные методы выделения водных масс в морях и океанах (Тимофеев и Панов, 1962). Эти методы базируются на анализе горизонтального и вертикального распределения отдельных характеристик среды. Остановимся кратко на двух из них, взаимно дополняющих друг друга.

В основе первого метода лежит анализ пространственного распределения величин наиболее репрезентативного показателя. При таком способе выделения водных масс для установления границы или линии фронта

между водными массами используется производная градиента выбранного показателя по расстоянию.¹ В данном случае под термином «фронт» понимается такая линия, где градиент используемой характеристики максимален и скорость изменения его равна нулю. Так как в природе чаще всего встречаются водные массы, в которых градиент гидрологической характеристики не равен нулю и непостоянен, то использование данного метода для выделения границ между водными массами ограничено. Однако, несмотря на это, данная методика позволяет легко анализировать массовый материал гидрологических наблюдений для выделения водных масс. Это преимущество было учтено нами в условиях пресных водоемов и, как будет показано на примере волжских водохранилищ, дало положительные результаты.

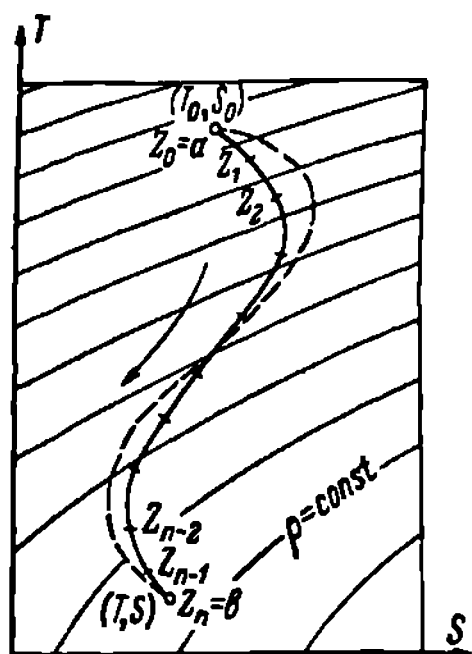


Рис. 94. T, S кривая океанологической станции.

Второй метод выделения водных масс основан на использовании одновременно двух показателей и построении T, S кривых. Метод интерпретации океанологических наблюдений в виде T, S -кривых был введен Геланд-Ганзенем (Helland-Hansen, 1918) и оказался мощным средством океанографического анализа. Для построения T, S -кривых требуются данные о распределении температуры и солености по глубинам. На T, S -диаграмму наносят T, S -точки по температуре и солености, которые наблюдались на каждом горизонте. Подписывая у этих точек значения глубин соответствующих горизонтов и соединяя эти точки плавной кривой, получают T, S -кривую исследуемой станции (рис. 94). Поскольку температура и соленость суть функции глубины:

$$T = T(z), \quad S = S(z),$$

а сама T, S -кривая в T, S -координатах может рассматриваться как кривая некоторой функции

$$T = f(S),$$

то T, S -кривая является параметрической кривой. Параметром в данном случае служит глубина z (Мамаев, 1963).

Анализ функций вида $T = f(S)$ обычно называется T, S -анализом. Теоретическое обоснование и физический смысл его даны в работах В. Б. Штокмана (1946; Stockman, 1943, 1944) и получили дальнейшее развитие в исследованиях О. И. Мамаева (1963), поэтому нет необходимости излагать его. Отметим лишь, каким образом эта теория применяется при анализе реальных T, S -кривых.

При анализе T, S -кривых наиболее удобно пользоваться правилами, вытекающими из «геометрии T, S -кривых» В. Б. Штокмана и сформулированными О. И. Мамаевым (1963). В одном из этих правил говорится о том, что границей между двумя водными массами следует считать глубину, на которой процентное содержание этих масс, определяемое по прямой смешения или треугольнику смешения, составляет 50% для каждой из них. Не перечисляя все правила, рассмотрим с учетом их возможность применения данного метода для выделения водных масс в пресных водоемах.

¹ В. Т. Тимофеев и В. В. Панов (1962) называют это скоростью изменения градиента.

Для этих целей воспользуемся данными наблюдений, выполненных в Рыбинском водохранилище 8—9 апреля 1967 г. На диаграмме типа T, S построим кривую, но вместо солености используем электропроводность. На рис. 95 представлены две такие кривые для моложского участка Рыбинского водохранилища. Рассматривая эти кривые, можно заметить, что каждая из них характеризуется одним экстремумом (на глубине около 4 м) и двумя ветвями — поверхностной (от 1 до 4 м) и придонной (от 4 м до дна). Это свидетельствует о том, что на данных станциях следует предполагать наличие трех водных масс, особенности которых мы рассмотрим в соответствующем разделе работы, а также указывает на то, что данный метод в известных случаях можно использовать при анализе водных масс континентальных водоемов.

При выделении водных масс в волжских водохранилищах мы также исходили из общего анализа распределения прежде всего физико-хими-

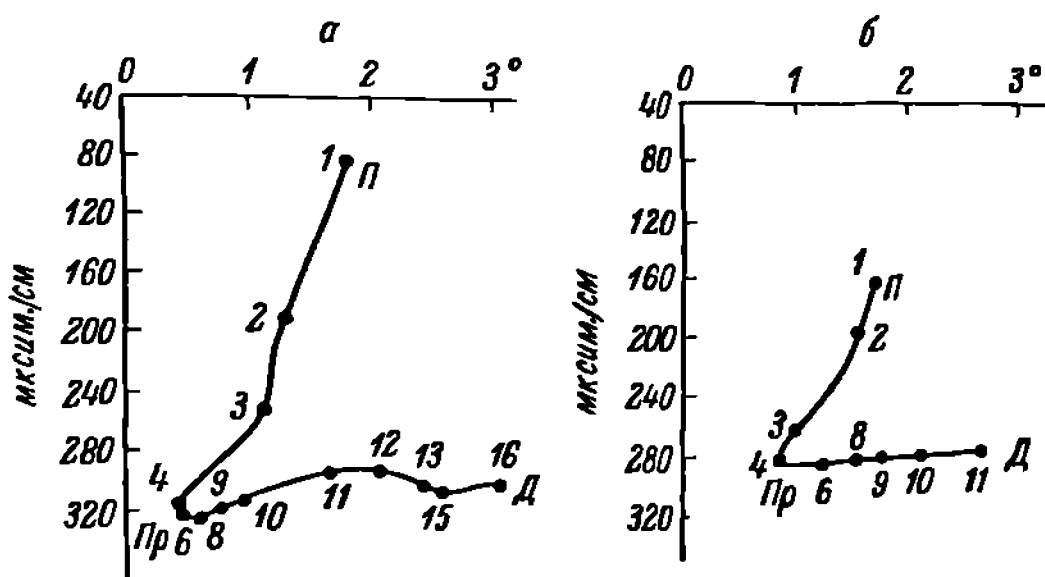


Рис. 95. T, θ -кривые для станции 42 (а) и 43 (б) в Рыбинском водохранилище 8—9 апреля 1967 г.

П — поверхностная водная масса; Пр — промежуточная; Д — донная.
Цифры на кривых — глубины, м.

ческих характеристик вод. Такой анализ включает построение карт-схем пространственного распределения всех показателей, характеризующих основные физико-химические свойства водных масс, а также продольных и поперечных разрезов по важнейшим профилям водохранилищ. На карта-схемах и разрезах проводились изолинии через интервалы, большие или равные возможной ошибке метода измерения соответствующего показателя. Так, на карта-схемах распределения температуры изотермы проводились через 1° , изолинии прозрачности — через 10 см, изолинии цветности — через 10° , изокансы — через 10 мксим./см, изолинии гидрокарбонатов и общей жесткости — через 0.1 мг-экв. л. Для Рыбинского водохранилища карты-схемы строились обычно для поверхностного и придонного горизонтов, а в отдельных случаях и для середины глубины.

На карта-схемах и разрезах районы размещения водных масс характеризуются отсутствием или сильным разряжением изолиний показателей, в то время как во фронтальных зонах наблюдается значительное их сгущение (рис. 96 и 97). Такое пространственное распределение температуры и электропроводности и было использовано первоначально для выделения водных масс в Рыбинском водохранилище (Рыбопромысловый атлас Рыбинского водохранилища, 1963). Учитывая, что при выделении водных масс желательно принимать во внимание и другие физико-химические свойства воды, мы в дальнейшем дополнительно к температуре и электропроводности использовали гидрокарбонаты, жесткость и содержание в воде ионов кальция (Буторин и Бакулин, 1963). Имея данные о пространственном распределении характеристик, можно рассчитать

а по измерениям и определить границы между

ских водохранилищ наиболее распространенным и кон-
всех определений нами оказалась удель-
проводность. Расчеты горизонтальных и вертикальных слу-
ш вертикальных градиентов электропроводности позволили нам

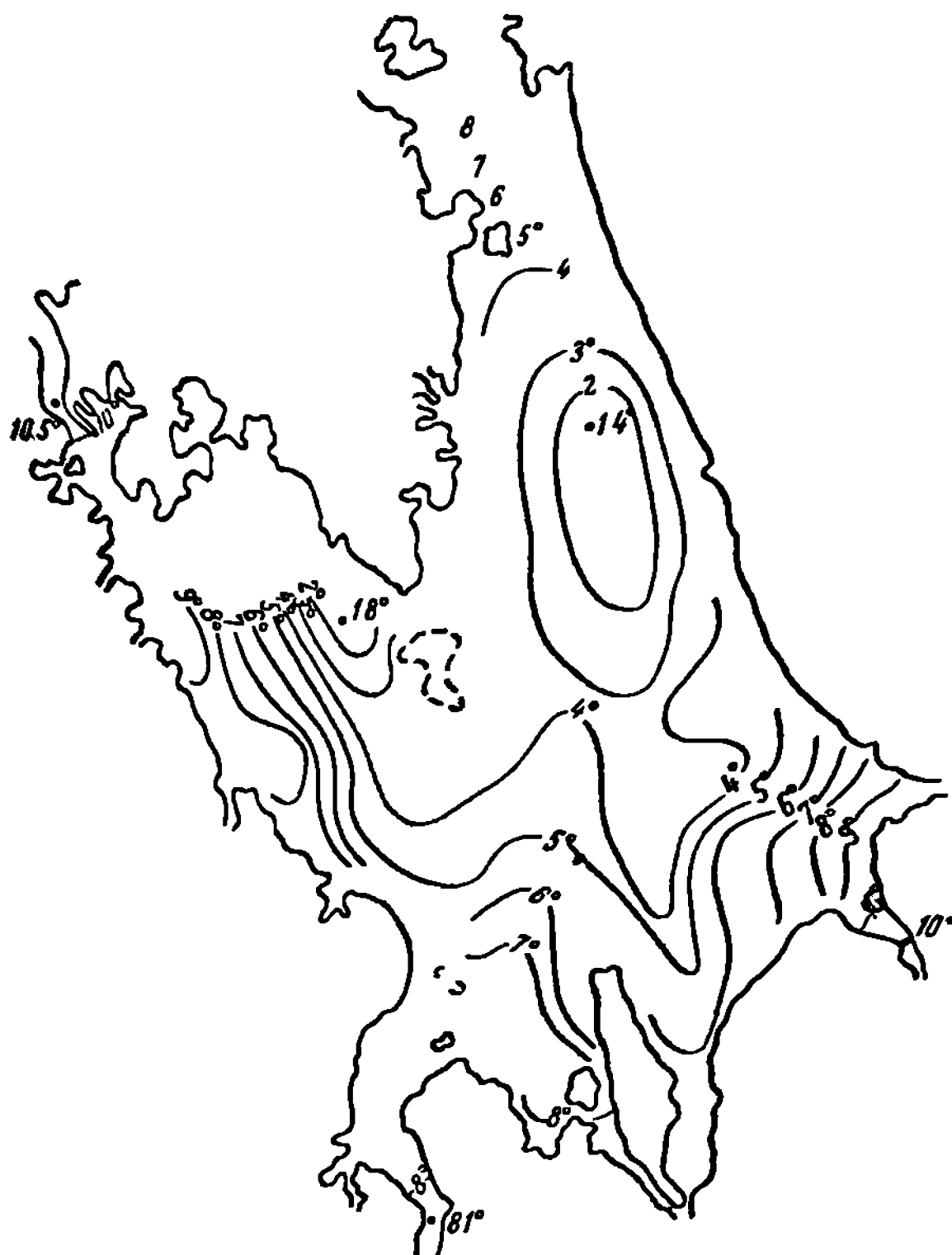


Рис. 96. Распределение температуры воды в поверхностном слое Рыбинского водохранилища 9 мая 1960 г.

строго подойти к выделению водных масс и установлению границ между ними. Районы водохранилищ, где градиент электропроводности практически не менялся или был близок к нулю, согласно этому методу занимали определенные водные массы, а плоскость, проходящая через точки, в которых этот градиент имел максимальное значение, принималась за границу раздела соседних водных масс. Иными словами, данная плоскость представляет собой фронт.

На рис. 98 представлены два гидрологических разреза на различных участках Рыбинского водохранилища. На них нанесены вертикали комплексных станций и изолиниями показано распределение электропроводности. По характеру расположения изокон на этих разрезах легко выделяются отдельные водные массы и границы между ними. Так, на

моложском участке до бывшего сел. Горькая Со в есной между станциями 38 и 39 хорошо прослеживается резкое увеличение градиенто температуры и электропроводности (рис. 98, а). Оно обус о тельно см ешением моложских вод с водами центральной части во о раяилища. С левой стороны по разрезу расположена моложская водная масса с относительно высокой температурой и низкой электропроводностью, с правой — более минерализованная и холодная водная масса цен ральной час и водохранилища.



Рис. 97. Распределение электропроводности (в мксим./см) в поверхностном слое Рыбинского водохранилища 9 мая 1960 г.

Значительные градиенты электропроводности наблюдаются в зимний период на водоразделе между Волгой и Суткой по разрезу Борок—Коприно. Как видно из рис. 98, б, бо́льшая часть разреза занята высокоминерализованной волжской водой, а левобережная пойма заполнена мягкими водами неволжского происхождения.

Величины горизонтальных градиентов электропроводности между отдельными станциями в Рыбинском водохранилище (табл. 75) указывают на то, что в волжских водохранилищах в течение большей части года вполне возможно найти плоскость, проходящую через точки с максимальными значениями градиента электропроводности.

Одновременно с определением границ раздела между водными массами по максимальным градиентам гидрологических характеристик была предпринята попытка принять в качестве границы между ними плоскость, проходящую через точки 50-процентного смешения соседних водных масс.

Градиенты электропроводности (в мксм./ см на км) в поверхностном слое воды
Рыбинского водохранилища

Водная масса	Номер стан- ция	1960						1961			
		9 V	3 VI	12 VII	28 VII	4 X	27 X	14 20 II	17—24 III	12 V	
Волжский по- ток	1	0	0	—	0	1	1	1	1	0	
	2	0	0	—	0	2	1	1	2	0	
	3	0	0	—	1	4	5	1	1	1	
	7	4	2	—	1	1	1	0	1	3	
	8	16	8	—	0	1	3	6	3	3	
	14	5	1	—	1	1	1	1	8	7	
Моложский по ток	36	0	1	0	1	1	1	—	—	1	
	37	0	0	2	2	4	5	—	—	0	
	38	1	1	1	1	0	0	1	1	7	
	39	0	0	1	0	0	1	1	5	4	
	42	6	4	1	1	1	0	2	3	5	
	43	4	1	0	0	0	1	3	5	0	
	47	8	1	—	0	0	1	1	2	4	
	7										
Шекснинский поток	23	2	1	0	2	1	0	11	—	4	
	24	0	0	0	2	1	1	1	1	4	
	25	7	3	0	1	1	1	4	5	10	
	26	2	2	—	1	0	0	1	1	4	
	31										

Иными словами, использовать при выделении водных масс в водохрани-
лищах волжского каскада элементы *T*, *S*-анализа.

Для определения степени смешения водных масс существуют извест-
ные формулы и приемы. Формулы смешения представляют собой обычные
формулы средневесовых величин (Зубов и Сабинин, 1958). Так, для усло-
вий полного смешения двух однородных водных масс в морских условиях
О. И. Мамаев (1963) приводит следующие формулы определения основных
характеристик смеси:

$$\bar{T} = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2},$$
$$\bar{S} = \frac{m_1 S_1 + m_2 S_2}{m_1 + m_2},$$

где \bar{T} — температура смеси;
 m_1 и m_2 — пропорции (массы) или объемы водных масс, участвующих
в смешении;
 T_1 и T_2 — температура первой и второй водных масс;
 \bar{S} — соленость смеси;
 S_1 и S_2 — соленость первой и второй водных масс.

Зная координаты характеристик смешивающихся водных масс и коор-
динаты *T,S*-индекса смеси (\bar{T} , \bar{S}), легко определить процентное содер-
жание каждой исходной водной массы. Действительно, при рассматри-
ваемых условиях положение водной массы на *T, S*-диаграмме будет опре-
деляться ее *T, S*-точками (рис. 99). В случае линейной зависимости между
результатирующим свойством и пропорциями смешения результат полного
смешения водных масс будет характеризоваться \bar{T} , \bar{S} -точкой, лежащей
на прямой, называемой прямой смешения. Последняя в данном случае
представляет собой частный случай *T,S*-кривой. По ней и определяется

процентное содержание исходных водных масс. Так, точке M с координатами (\bar{T}, \bar{S}) на рис. 99 соответствует 64% водной массы A и 36% водной массы B .

Однако в реальных условиях водоема трудно ожидать полного смешения вод, так как помимо процессов смешения происходят процессы,

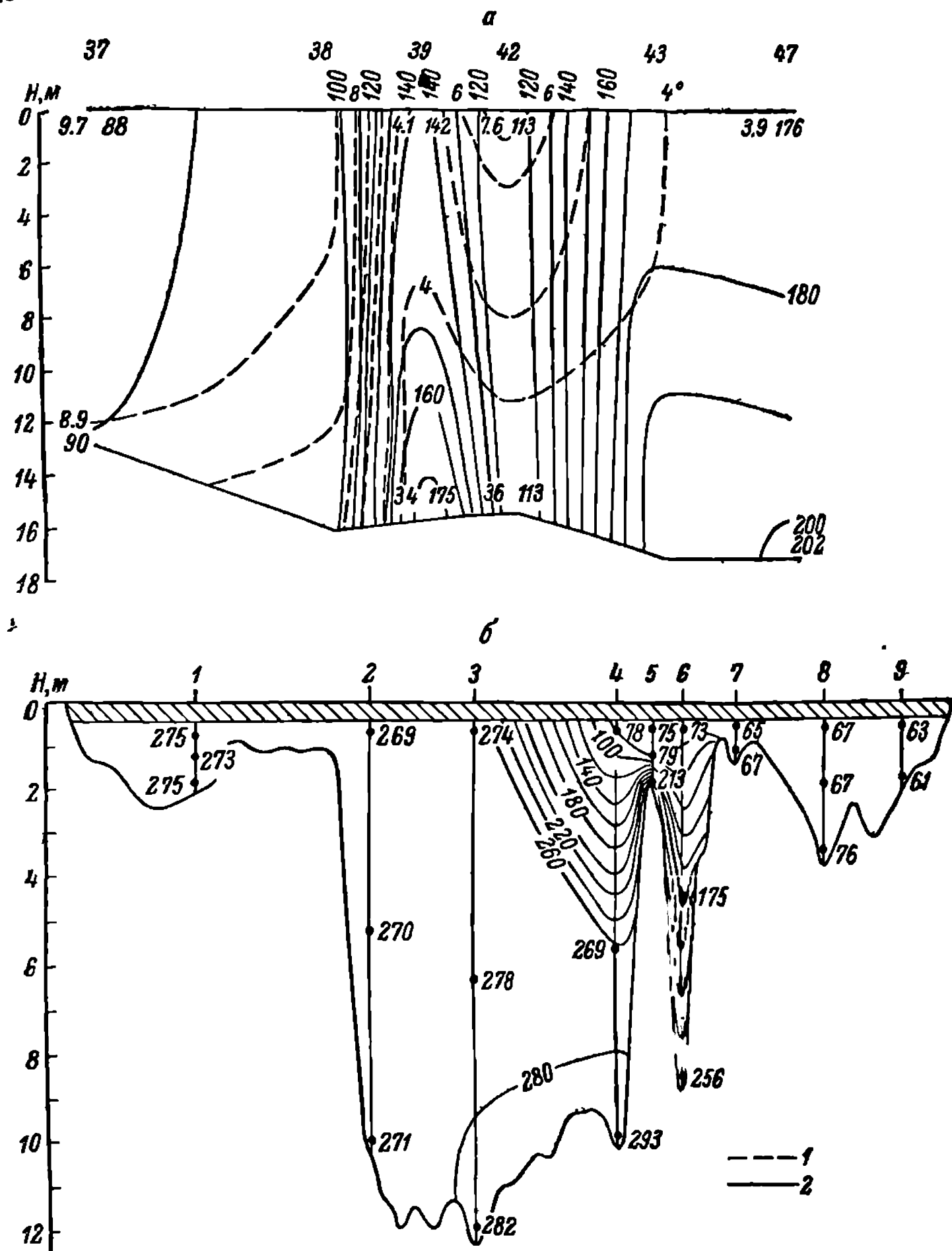


Рис. 98. Распределение температуры (1) и электропроводности (2) по ходу моложского потока 9 мая 1960 г. (а) и на разрезе Борок—Коприно зимой 1962 г. (б).

поддерживающие свойства исходных водных масс. В результате наблюдается обычно частичное смешение водных масс. При частичном смешении вод T, S -точки, соответствующие разным значениям глубин, могут и не лежать на прямой смешения. Этот случай близок к случаю смешения трех однородных водных масс. Если характеристики трех водных масс на T, S -диаграмме не лежат на одной прямой, то они образуют треугольник

смешения (рис. 100). Соответствующие характеристики смеси при этом определяются теми же формулами смешения:

$$\bar{T} = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2 + m_3 T_3}{m_1 + m_2 + m_3},$$

$$\bar{S} = \frac{m_1 S_1 + m_2 S_2 + m_3 S_3}{m_1 + m_2 + m_3}.$$

Результат полного смешения трех водных масс, как и в первом случае, будет изображаться T, S -точкой с координатами \bar{T} , \bar{S} , но уже лежащей внутри треугольника смешения или на одной из его сторон. Зная положение результирующей T, S -точки в треугольнике смешения, можно определить доли, или процентное содержание каждой водной массы, участвующей в смешении. Для этого каждую сторону треугольника смешения разбивают на десять частей и точки деления соединяют прямыми, параллельными каждой из сторон треугольника смешения. Получается номограмма, по которой и определяется процентное содержание каждой водной массы (рис. 100).

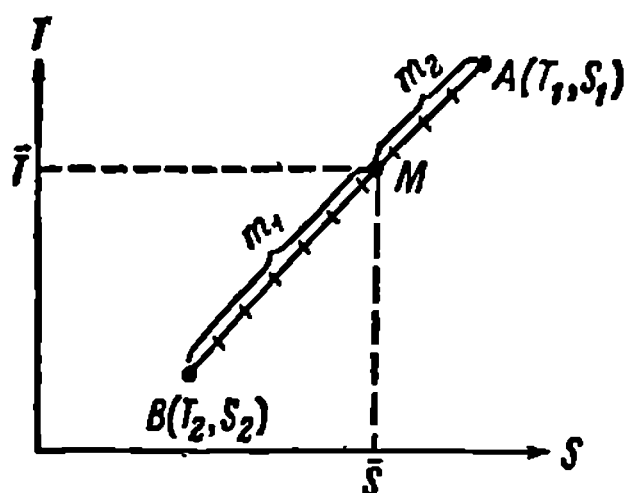


Рис. 99. Прямая смешений двух водных масс (по О. И. Мамаеву, 1963).

Наши исследования показали, что с помощью треугольников смешения можно вычислять процентное содержание водных масс и в пресном водоеме (Буторин, 1966б). Естественно, что применение этого метода при расчете в больших континентальных водоемах ограничено. Прежде всего ввиду большой изменчивости характеристик пресных вод в годовом цикле экстремаль-

ные значения их для отдельных водных масс также сильно меняются по сезонам и номограммы приходится строить для каждого конкретного случая. При неточном определении крайних значений характеристик водных масс для построения треугольников смешения много точек ложится за пределы треугольников. При относительно больших размерах и мелководности водохранилищ этому способствует также наличие в отдельных районах неучтенных местных вод склонового стока, отдельных притоков и грунтовых вод.

Несмотря на указанные ограничения, с помощью данного метода нам удалось для ряда конкретных случаев в Рыбинском водохранилище рассчитать процентное соотношение различных водных масс и представить вертикальную структуру вод водоема (Буторин, 1966б).

Аналогичные формулы смешения имеются также для открытых лиманов и пресных вод. Так, для определения солености и концентрации главных ионов лиманов, воды которых формируются в результате смешения морских и речных вод, А. М. Алмазовым (1956) приводятся следующие формулы смешения:

$$\Sigma = \frac{\Sigma_{\text{м}} V_{\text{м}} + \Sigma_{\text{р}} V_{\text{р}}}{V_{\text{м}} + V_{\text{р}}},$$

$$Cl' = \frac{Cl_{\text{м}} V_{\text{м}} + Cl_{\text{р}} V_{\text{р}}}{V_{\text{м}} + V_{\text{р}}},$$

где Σ — сумма ионов (соленость) в воде лимана, мг/л;
 $\Sigma_{\text{м}}$ и $\Sigma_{\text{р}}$ — сумма ионов в морской и речной воде, мг/л;
 $V_{\text{м}}$ и $V_{\text{р}}$ — объемы морской и речной воды, участвующие в смешении;
 Cl' — концентрация хлор-ионов в воде лимана, мг/л;

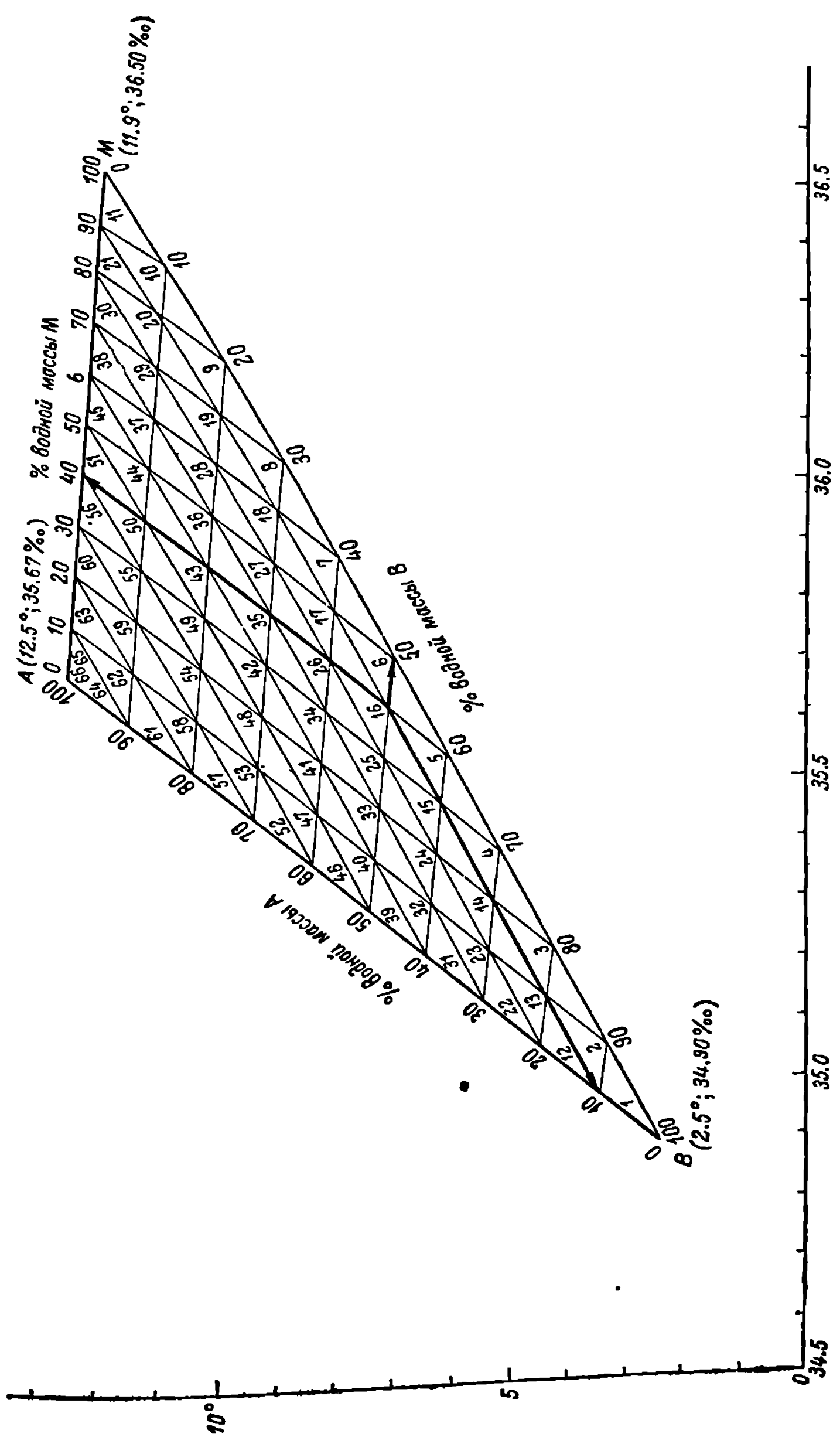


Рис. 100. Треугольник смешения (по О. И. Мамаеву, 1963).

Cl_m и Cl_p — концентрации хлор ионов в морской и речной воде, мг/л.

В случае смешения в лимане не двух, а трех водных масс формулы примут вид

$$\sum \frac{\sum_m V_m + \sum_{p_1} V_{p_1} + \sum_{p_2} V_{p_2}}{Cl_m V_m + Cl_{p_1} V_{p_1} + Cl_{p_2} V_{p_2}},$$

На основании этих формул А. М. Алмазов дает уравнения для определения процентного соотношения вод, участвующих в смешении.

$$V_p = \frac{Cl_m - Cl}{Cl_m - Cl_p} \cdot 100\%,$$

$$V_m = \frac{Cl - Cl_p}{Cl_m - Cl_p} \cdot 100\%.$$

Используя эти формулы для пресных вод, А. А. Зенин (1965) применяет их в следующем виде: в случае смешения волжской и окской вод —

$$V_v = \frac{x_0 - x}{x_0 - x_v} \cdot 100\%,$$

в случае смешения волжской и камской вод —

$$V_k = \frac{Cl_k - Cl}{Cl_k - Cl_v} \cdot 100\%,$$

где V_v — объем волжской воды, %;

x_0 — величина электропроводности окской воды, мксим.;

x — величина электропроводности смеси, мксим.;

x_v — величина электропроводности волжской воды, мксим.;

Cl_k — концентрация хлоридных ионов в камской воде, мг/л;

Cl — концентрация хлоридных ионов смеси, мг/л;

Cl_v — концентрация хлоридных ионов в волжской воде, мг/л.

Из данных формул следует, что для определения степени смешения водных масс в какой-то точке водоема необходимо знать концентрацию какого-либо компонента в исходных водных массах (например, величину электропроводности), концентрацию этой характеристики в исследуемой точке после смешения и объем исходных водных масс, участвующих в смешении.

Располагая указанными материалами и несколько упрощая расчеты, мы попытались определить процентное соотношение водных масс, и по линии 50-процентного смешения их установить границы между ними в Рыбинском водохранилище. Сопоставление положения границ раздела соседних водных масс, определенных таким способом и по максимальному градиенту той же характеристики, показало, что в большинстве случаев они совпадают или близки друг к другу. В том случае, когда они не совпадают, наиболее вероятно, что в районе расчета присутствует не учтенная нами разновидность вод или исходные данные для расчета определены неправильно. Все это свидетельствует о том, что определяемые нами границы между водными массами в волжских водохранилищах вполне реальны и физически обоснованы.

Несмотря на некоторые положительные результаты применения указанных методов для выделения водных масс в континентальных водоемах, в использовании их существуют определенные затруднения. Так, при использовании метода максимальных градиентов весьма вероятны случаи, когда плоскости нескольких вполне репрезентативных показателей

пространственно не совпадают. В таких случаях трудно отдать предпочтение тому или иному показателю и выбор последнего оказывается в известной мере субъективным. Как указывает М. Г. Ершова (1968а), такие случаи могут наблюдаться в тех водоемах, где сопрягается несколько водных масс, имеющих различное происхождение, но обладающих близкими значениями показателей некоторых свойств.

При неустойчивом режиме и мелководности водохранилищ встречаются затруднения и при выделении водных масс по кривым типа T , S прежде всего из-за большого разброса точек, обусловленного как сезонной изменчивостью показателей, так и неодинаковой репрезентативностью последних. Все это приводит к неопределенности в проведении границ между отдельными водными массами.

В связи с этим при выделении водных масс в континентальных водоемах большое значение приобретает комплексный учет целого ряда показателей гидрофизического и гидрохимического состояния среды. В свою очередь, учет нескольких показателей одновременно для этих целей также затруднен, поскольку все они имеют различные единицы измерения и различную степень изменчивости. Поэтому прежде всего необходимо выразить значения используемых показателей в одной системе единиц. Для этого можно использовать метод стандартизации признаков (Sokal a. Sneath, 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 S_i — стандартизованное значение показателя;

x_i — численное значение показателя;

\bar{x} — среднее ряда;

σ — стандартное отклонение.

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

Формула для вычисления этого коэффициента имеет вид

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

где K_p — поправочный коэффициент;

T — удвоенная ошибка определения показателя, выраженная в долях от среднего (\bar{x});

C_v — коэффициент вариации ряда.

Из этой формулы видно, что если коэффициент вариации ряда связан в основном с точностью определения показателя ($T \rightarrow C_v$), то значимость этого показателя очень мала ($K_p \rightarrow 0$) и его удельный вес при сравнении различных характеристик незначителен. Как показали результаты наших исследований (Буторин и Смирнов, 1968б), коэффициент K_p оказался слишком «жестким» вследствие малообоснованного удвоения ошибки определения показателя T . Поэтому в дальнейшем при использовании данной методики следует за T принимать просто ошибку измерения или определения показателя.

Следовательно, общее выражение для вычисления стандартизованного значения показателя запишется в виде

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

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.

Разрабатывая этот метод на примере Рыбинского водохранилища, мы попытались получить коэффициенты различия d между каждой из станций на водоеме и всеми остальными по шести показателям: температуре, электропроводности, жесткости, гидрокарбонатам, кальцию и цветности 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 только при использовании электронно-счетной вычислительной машины. Поэтому на основе изложенного метода была составлена программа для электронно-счетной вычислительной машины БЭСМ-2 М, на которой и были выполнены соответствующие расчеты.

В машину засылалась информация о длине ряда (количестве 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 и всеми последующими по всему комплексу показателей, среднее значение каждой характеристики по всему водоему, стандартное отклонение, коэффициент вариации и стандартизованные значения характеристик.

На первом этапе работ был выполнен анализ данных 12 съемок, проведенных в 1960—1961 гг. В табл. 76 представлены число станций в съемке и принятые точности определения элементов, а также средние значения использованных показателей по всему водоему и величины σ и C_i , полученные из анализа данных для 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 из этой таблицы, наибольшая неоднородность вод водохранилища наблюдается в весенний период, а наибольшая однородность 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. нужно 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, характеризующихся только одним признаком. Примем тогда значимой такую разность значений этого признака, чтобы она

удовлетворяла вероятности случайного отклонения от среднего всей совокупности, равной 0.01, т. е. обычно принимаемой в математической статистике вероятности, достаточной для отнесения точки к другой совокупности. Этому значению вероятности удовлетворяет разность значений признаков, равная 2.6σ :

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

Преобразуем это выражение следующим образом:

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

В случае $K_p=1$

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

тогда

$$(S_n - S_m)_{\text{зн.}} = 2.6,$$

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

Теперь возьмем совокупность точек, характеризующих двумя независимыми признаками. Вероятность случайного однозначного 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 в этом случае будут равны 1.7σ .

Если $\Delta x_{\text{зн.}} = 1.7\sigma$, то $(S_n - S_m)_{\text{зн.}} = 1.7$,

$$d_{\text{зн.}} = \sqrt{(S_n - S_m)_1^2 + (S_n - S_m)_2^2} = \sqrt{(1.7)^2 + (1.7)^2} = 2.4.$$

Рассуждая таким же образом для случая совокупности, характеризующей тремя и четырьмя независимыми признаками, соответственно получим

$$\Delta x_{\text{зн.}} = 1.3\sigma, \text{ а } d_{\text{зн.}} = 2.2$$

и

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

В практике гидрологических исследований континентальных водоемов

Т а б л и ц а 76
Средние значения, стандартные отклонения и коэффициенты вариаций показателей водных масс по данным сырьевых срезов 1960—1961 г.

Показатель	9 V 1960			28 VII 1960			4 X 1960			14 II 1961			Припаятая точка ность определения показателя
	среднее	σ	C _g	среднее	σ	C _g	среднее	σ	C _g	среднее	σ	C _g	
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
Гидрокарбонаты 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
Кальций, 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
Щелочность, град. Сг-Со	38	14	0.37	26	7	0.28	30	4	0.14	38	15	0.39	0.12
Число станции	—	45	—	—	60	—	—	54	—	—	39	—	—

Расчетные значения в соответствии с теоретическими, отражающие открытую принадлежность
материи вод к одной водной массе

Показатель водных масс	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, °С	3.13	0.08	0.65	1.75		4.15	0.44	0.74	—		1.04	1.46	1.52	—	
Электропроводность, мксм./см	2.69	1.16	3.62	2.74		3.44	2.83	3.43	—		3.41	0.72	0.11	—	
Гидрокарбонаты, мг-экв./л	3.15	0.83	2.76	2.54		3.50	2.53	3.36	—		3.97	0.33	0.33	—	
Жесткость, мг-экв. л. . .	2.70	0.53	1.94	1.78		3.13	2.00	3.27	—		3.37	0.07	0.72	—	
Кальций, мг-экв./л . . .	2.77	0.88	3.53	1.50		2.41	3.78	3.50	—		3.18	1.50	0.47	—	
Цветность, град. Сг—Со	2.11	1.70	2.08	2.23		3.42	2.86	0.69	—		3.03	1.70	2.08	—	
Значение <i>t</i> при вероят- ности нуль-гипотезы	2.05	2.00	2.01	2.04		2.06	2.00	2.01	—		2.06	2.00	2.01	—	
Значение <i>t</i> при вероят- ности нуль-гипотезы	2.76	2.66	2.68	2.75		2.79	2.66	2.68	—		2.79	2.66	2.68	—	
1 : 100															
2.75															

редко приходится иметь дело с более чем тремя—четырьмя независимыми признаками, характеризующими состояние водных масс, поэтому с определенной погрешностью в выборе критерия вероятности $d_{зн.}$ 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, следовательно, $K_p \neq 1$. В этом случае формула для вычисления $d_{зн.}$ в общем виде запишется следующим образом:

$$d_{зн.} = \mu \sqrt{\sum K_p^2},$$

где μ представляет собой величину превышения σ и должно выбираться в зависимости от числа независимых показателей, 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:

$$t = t_0 + \sum (1 - r),$$

где t_0 — число действительно независимых признаков; r — коэффициент корреляции между зависимыми признаками. Однако с определенной погрешностью в сторону занижения вероятности случайного получения d , можно принимать

$$t = t_0.$$

Расчитав $d_{зн.}$ по результатам анализа данных 12 гидрологических съемок Рыбинского водохранилища с использованием перечисленных выше показателей, мы получили среднюю величину

$$d_{зн. \text{ ср.}} = 2.4 \pm 0.3.$$

С вероятностью случайного превышения, лежащей в пределах 0.05—0.01, эту среднюю величину можно принять вполне значимой для отнесения двух станций к различным водным массам во всех съемках водохранилища независимо от сезона года.

В качестве примера использования указанного статистического метода для выделения водных масс в Рыбинском водохранилище 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 для этих съемок представлены в табл. 76.

Как было показано выше, 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 весенней съемки, поскольку, как было показано нами (Рыбопромысловый атлас Рыбинского водохранилища, 1963; Буторин, 1965б, 1966в) и как видно из данных табл. 76, в этот период наблюдается наибольшая неоднородность водных масс в Рыбинском водохранилище.

В процессе исследования водных масс Рыбинского водохранилища нами установлено, что районы выхода основных речных потоков в водохранилище весной заполнены водными массами соответствующих рек. Поэтому ст. 1 в волжском потоке, ст. 36 в моложском и ст. 23 в шекснинском потоках приняты как исходные, характеризующие водные массы соответствующих рек в более или менее чистом виде. Из этих точек 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 равнялось 2.4, то в таком случае водные массы на них были различны.

В результате такого приема для весеннего периода удалось по комплексу признаков четко выделить районы со специфическими водными массами (рис. 101, а). При этом оказалось, что различия d для речных водных масс и вод центральной части водохранилища достигают значений, равных 5—6. По наибольшей величине d за реперный центр вод центральной части водохранилища была принята ст. 14 (см. рис. 101). Анализ величин d этой станции со всей совокупностью окружающих позволил выделить ядро водной массы центральной части водохранилища, которое по своим свойствам наиболее резко отличается от речных водных масс.

В летний период для рассматриваемой съемки не удалось выделить волжских и шекснинских вод в районе водохранилища, покрытом наблюдениями, и только на ст. 36 и 37 четко определилась моложская водная масса (рис. 102, а). В этом сезоне большая часть водохранилища заполнена трансформированными водами весеннего половодья, весьма однородными по акватории водоема. Никакого ядра вод с резко выраженными свойствами в центральной части водохранилища во время этой съемки не наблюдалось (рис. 102, б). Большая однородность вод водохранилища летом 1960 г. и, в частности, отсутствие волжской и шекснинской речных водных масс в районах выхода в водоем соответствующих потоков связаны, по-видимому, с исключительно малым летним стоком. Например, для Волги летний сток в 1960 г. составлял всего 0.2 км³.

Действительно, с резким увеличением стока Волги в осенний период (в сентябре—октябре — 1.9 км^3) наряду с моложской водной массой достаточно четко выделяются и волжские воды. В этом сезоне они прослежи-

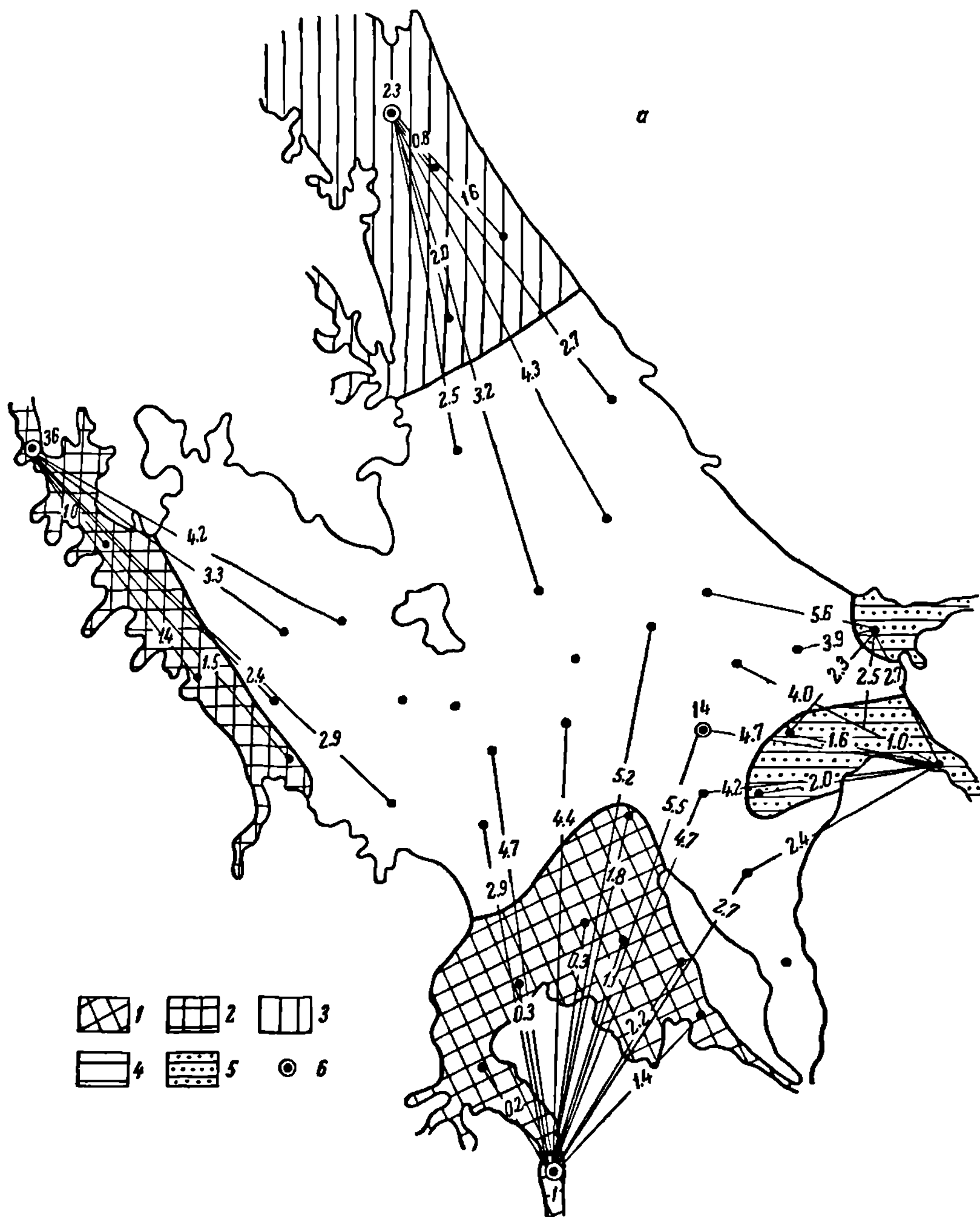


Рис. 101. Схема выделения водных масс в Рыбинском водохранилище в весенний период.

a — речные водные массы; b — водная масса центральной части водохранилища: 1 — волжская водная масса, 2 — моложская водная масса, 3 — шекснинская водная масса, 4 — ядро водной массы центральной части водохранилища, 5 — воды Ухры и Согожи, 6 — номера реперных станций. Цифры на линиях — величины коэффициента d .

ваются даже в районе Шумаровского острова (рис. 103, a). В то же время, когда сток Шексны осенью рассматриваемого года практически не увеличился по сравнению с летом, шекснинскую водную массу данным методом выделить не удалось. В этом сезоне, как и летом, большая часть водохранилища во время съемки была заполнена относительно однородной водной массой (рис. 103, b).

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 станции 1 и 2 в волжском потоке. Не имея материалов для рассматривае-

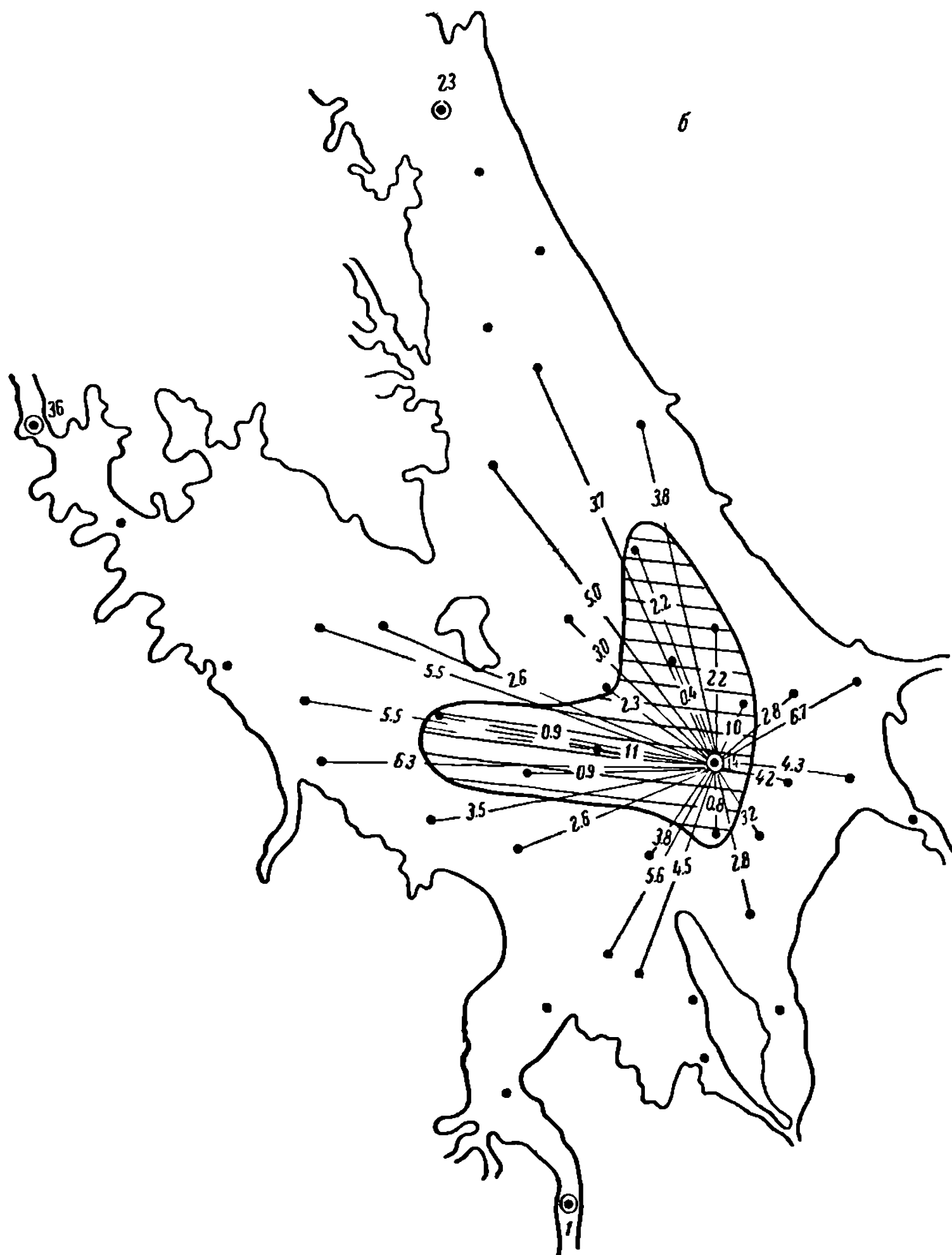


Рис. 101 (продолжение).

мой съемки по исходным точкам в моложском потоке, мы не могли выделить моложскую водную массу, а за исходную точку при выделении волжских вод пришлось принять ст. 3 (рис. 104, а). Это, видимо, несколько повлияло на расширение ареала распространения волжских вод, что сказалось, как будет видно далее, на оценке статистической реальности их выделения в зимний период (табл. 77).

Волжская водная масса в феврале 1961 г. занимала значительную площадь водохранилища и граница ее с водной массой центральной части

водохранилища прослеживалась очень четко (рис. 104, а). Значительное увеличение объема волжских вод зимой по сравнению с предшествующим сезоном объясняется большим зимним стоком Волги, который за период с ноября 1960 по март 1961 г. составил 7.4 км^3 , т. е. в 15 раз превысил 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,

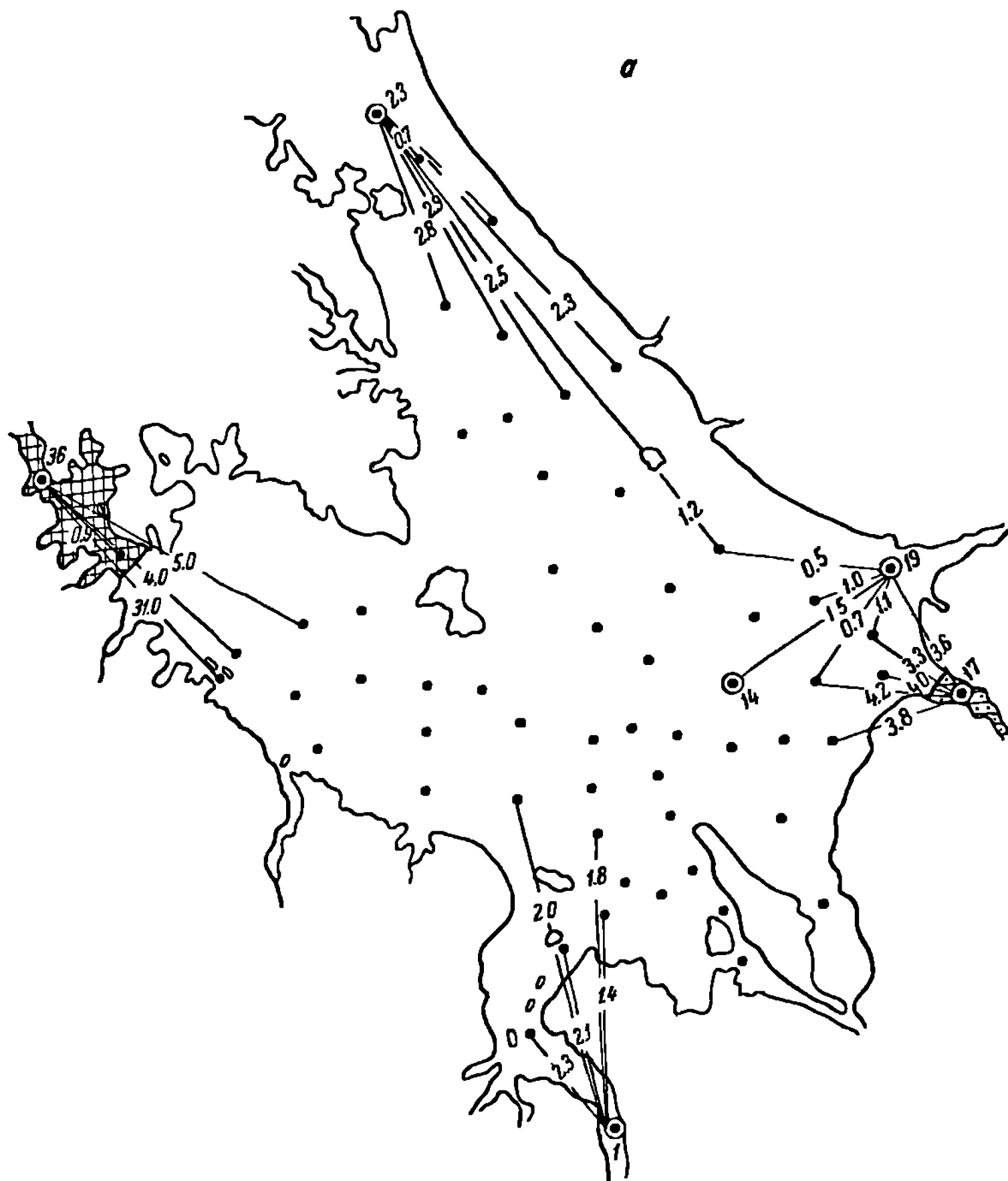


Рис. 102. Схема выделения водных масс в Рыбинском водохранилище летом.
Условные обозначения те же, что и на рис. 101.

воды ее четко прослеживались в районе исходной ст. 23 (рис. 104, а). Вероятно, 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 (рис. 104, 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 можно 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

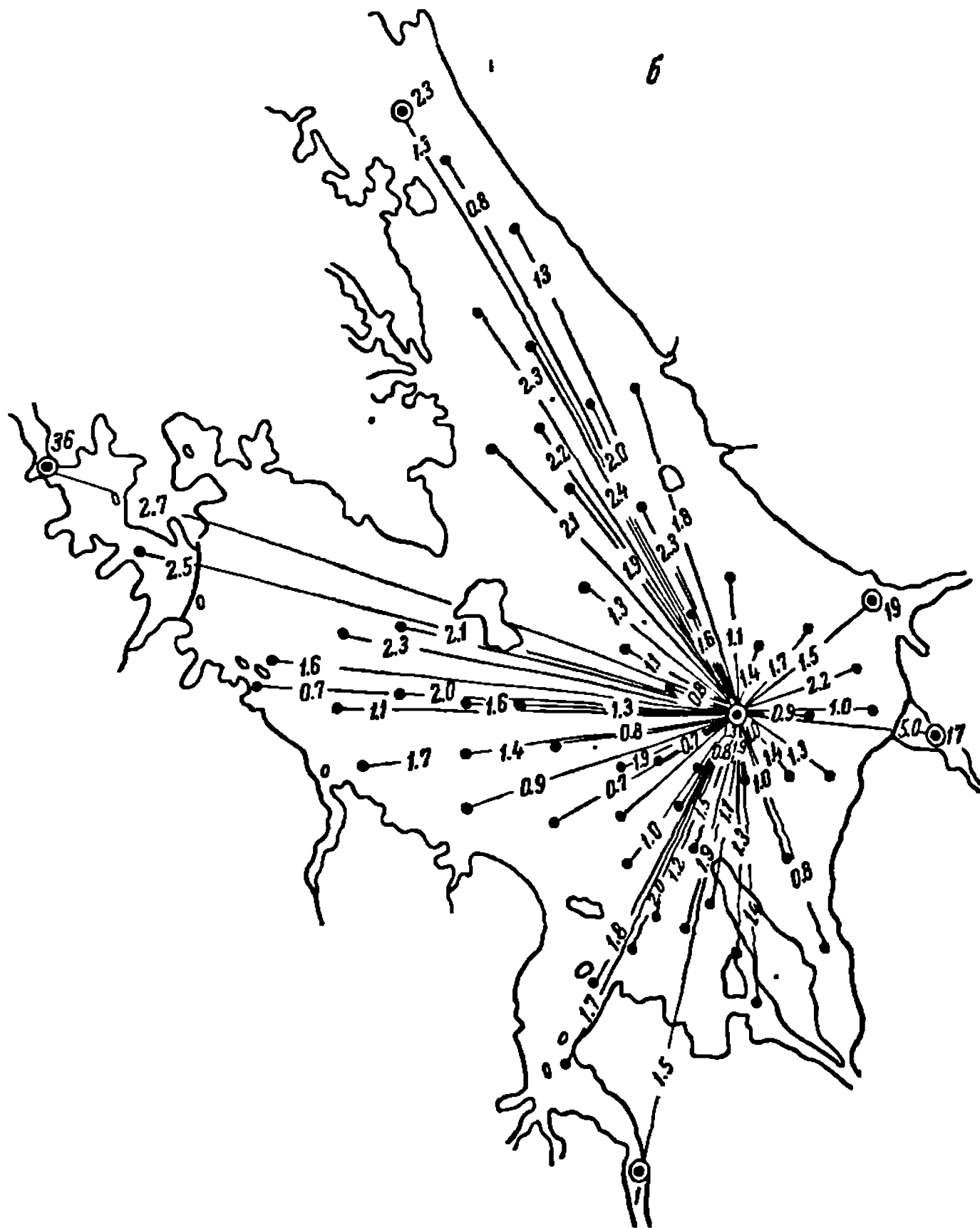


Рис. 102 (продолжение).

водных масс в Рыбинском водохранилище, полученные другими методами (Буторин, 1965б, 1966а).

Чтобы показать статистическую реальность различий в показателях выделенных нами водных масс в Рыбинском водохранилище, мы воспользовались t -распределением (распределение Стюдента) для случая сравнения двух средних независимых выборок (Брукс, 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

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

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, что критерий значимости для d определен нами достаточно объек-

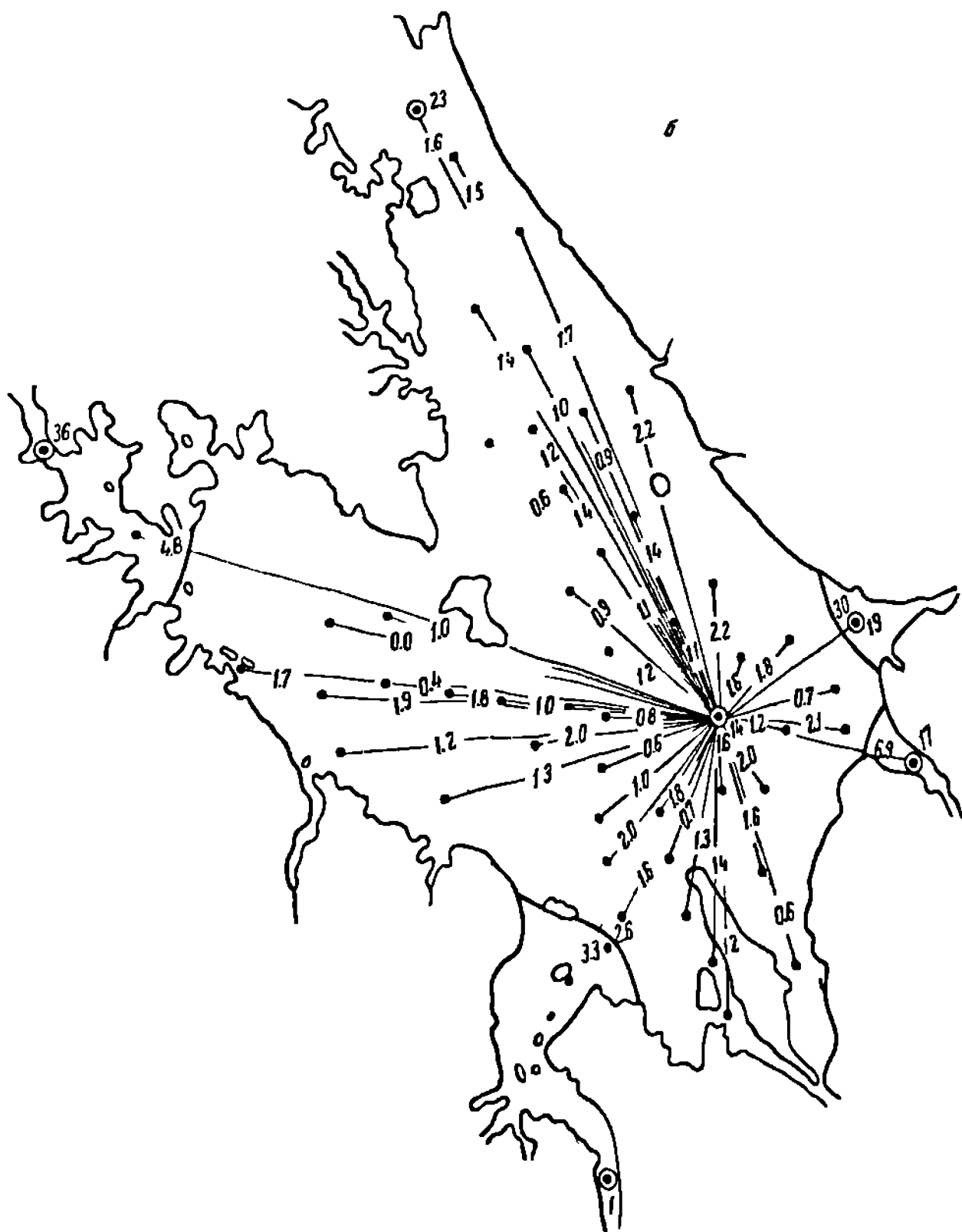


Рис. 103 (продолжение).

тивно, ибо в противном случае (например, при $d < 2.4$) имелась бы возможность выделения в летний период волжских и шекснинских речных вод, а в осенний — шекснинских. Но, как видно из табл. 77, в этом случае появились 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, гидрокарбонаты, жесткость и кальций. 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 насада. Преимущество данного метода перед другими за-

ключается прежде всего в том, что он позволяет использовать для выделения водных масс одновременно комплекс различных показателей и имеет статистически обоснованную расчетную основу, а также дает возможность оценить степень надежности результатов. Кроме того, применение его при

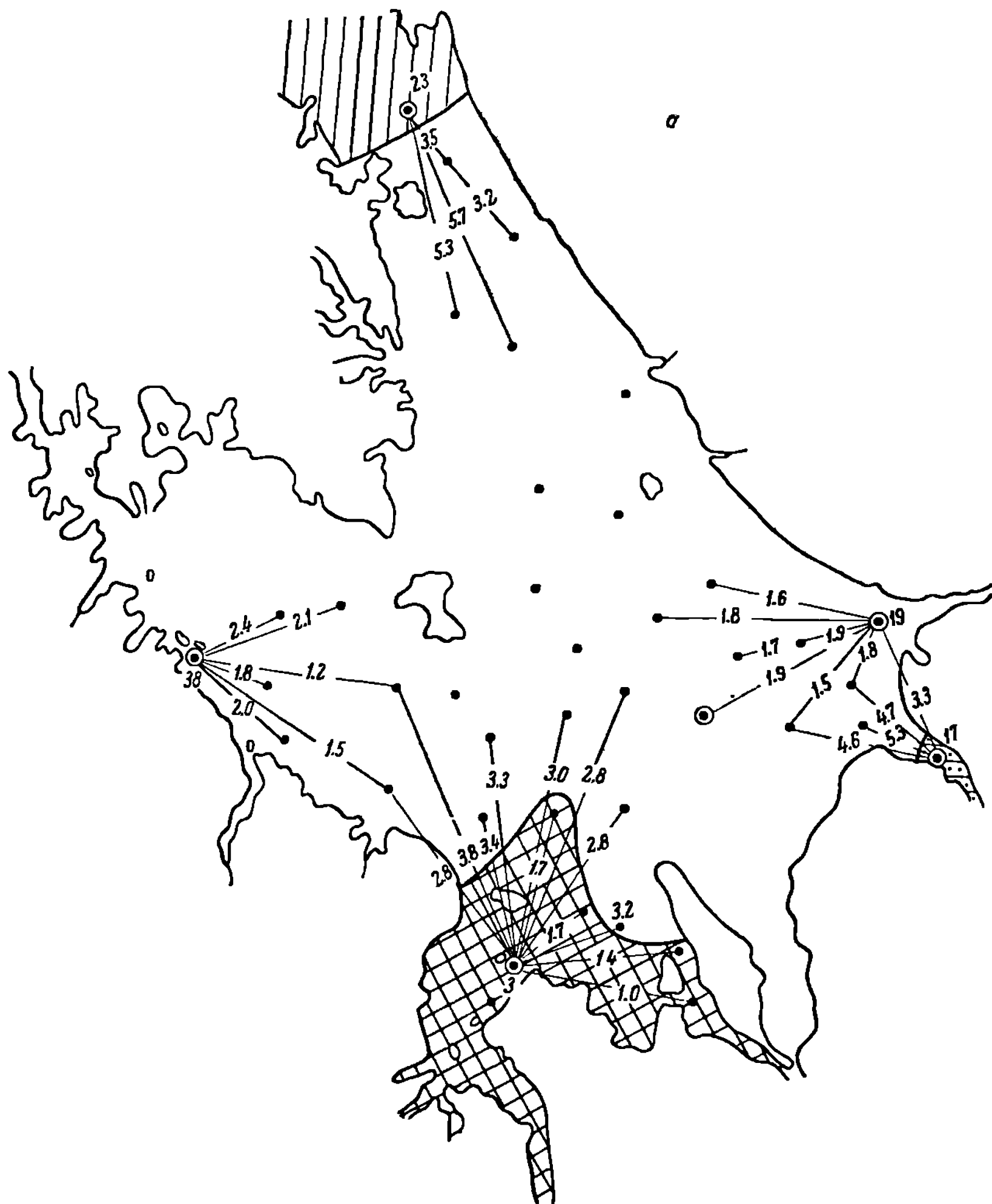


Рис. 104. Схема выделения водных масс в Рыбинском водохранилище зимой, Условные обозначения те же, что и на рис. 101.

выделении водных масс континентальных водоемов требует использования современной счетно-вычислительной техники. Положительные результаты, полученные с помощью статистического метода, дают основание полагать, что он может быть использован для подобных целей и в океанологических исследованиях.

Таким образом, статистический метод представляет собой первый опыт унифицированного метода выделения водных масс по крайней мере в пресных водоемах земли. Изложенный метод основан на достаточно

строгих критериях выделения водных масс. Однако при использовании его необходимо предварительно задаваться определенной величиной $d_{\text{к.}}$, выбор которой в какой-то степени субъективен.

В связи с этим представляет интерес предложение Ю. В. Николаева об использовании для выделения водных масс задачи о коммивояжере,

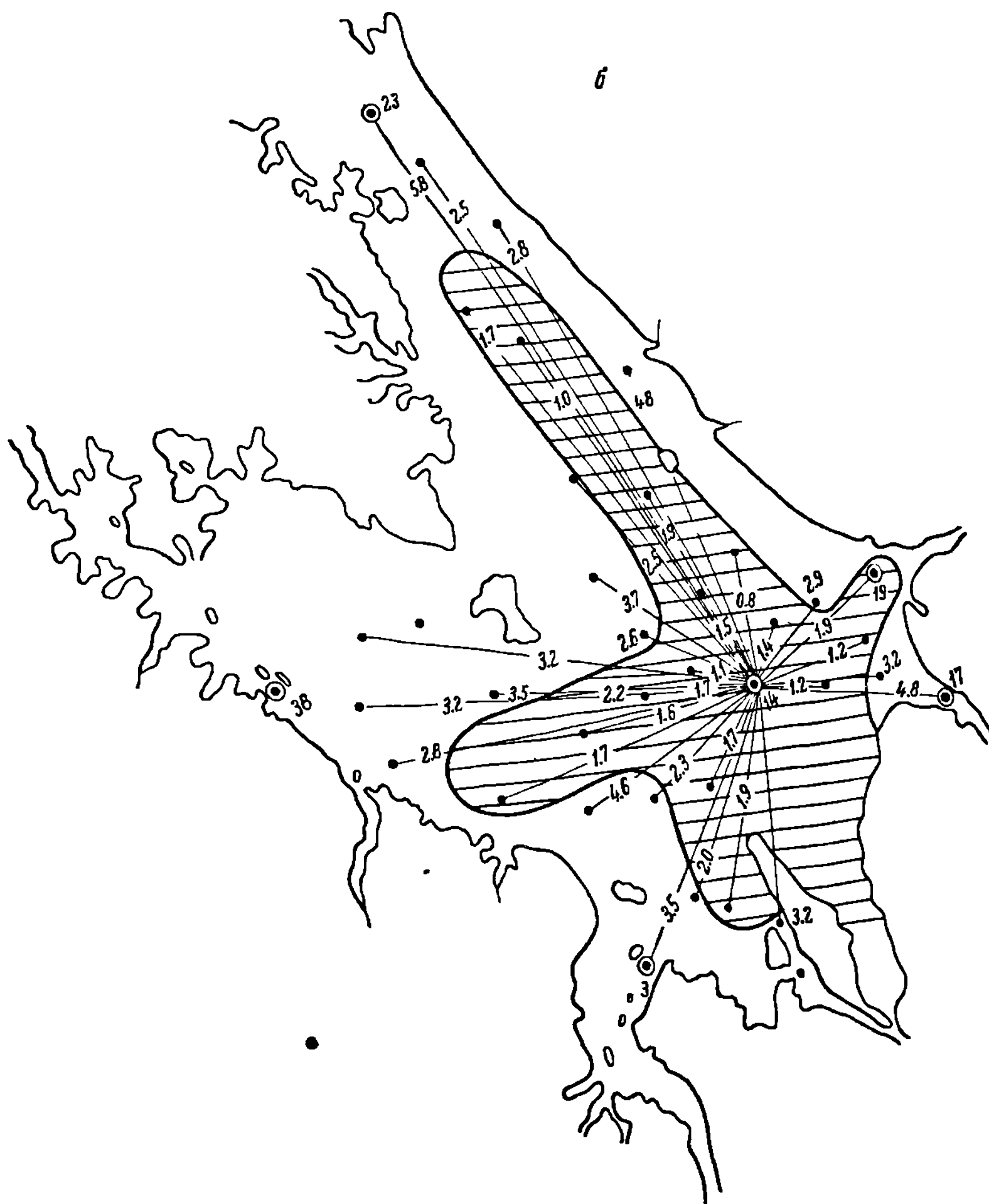


Рис. 104 (продолжение).

или метода оптимального цикла (Литл и др., 1965). Сущность данного метода состоит в том, что находится оптимальный вариант обхода точек с заданными показателями. При этом там, где будет наблюдаться переход к качественно новой совокупности точек, величина различия S по комплексу признаков окажется наибольшей. На графике это отразится пиком хода величин S , которые в отличие от значений d в ранее рассмотренном методе представляют различия между точками по комплексу признаков при обходе их по оптимальному пути.

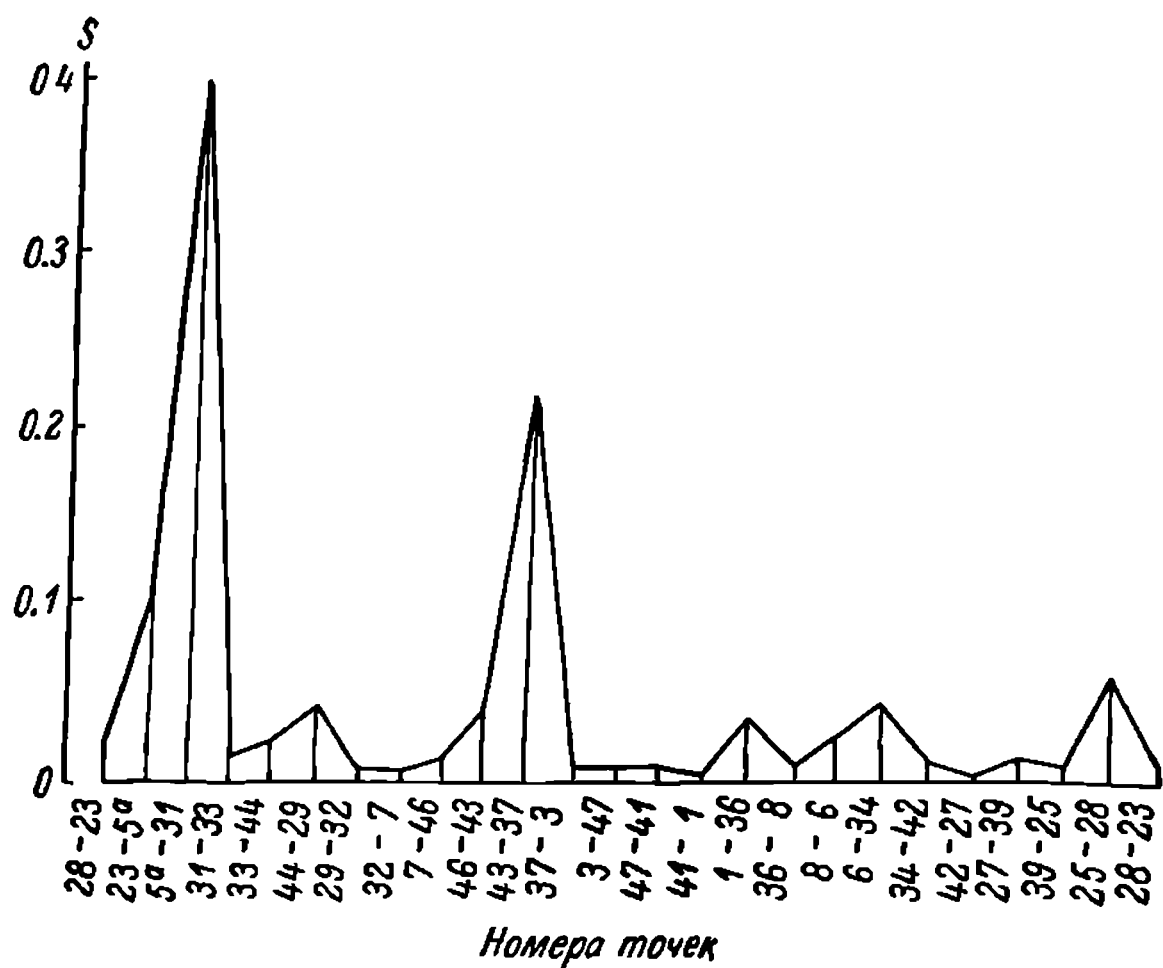


Рис. 105. График оптимального цикла для совокупности станций гидрологической съемки Рыбинского водохранилища 9 мая 1960 г.

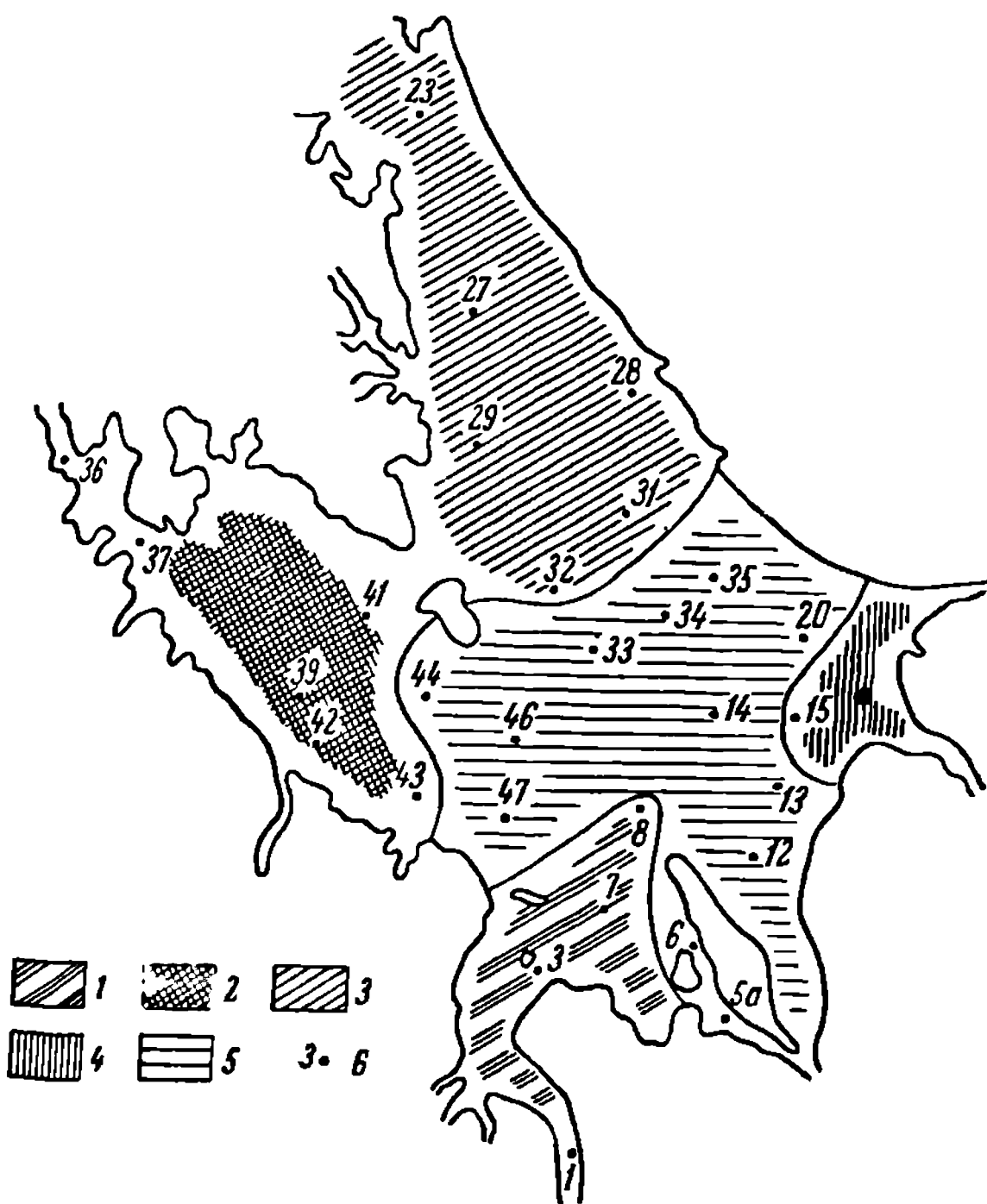


Рис. 106. Схема выделения водных масс Рыбинского водохранилища с помощью оптимального цикла.

1 — волжская водная масса; 2 — моложская водная масса; 3 — шекснинская водная масса; 4 — воды Ухры и Согожи; 5 — водная масса центральной части; 6 — номера станций.

В качестве примера использования данного метода для выделения водных масс в пресных водоемах приведен расчет, выполненный Ю. В. Николаевым для гидрологической съемки Рыбинского водохранилища 9 мая 1960 г. На рис. 105 показан график изменения значений S , из которого следует, что весной в Рыбинском водохранилище выделяются две разновидности вод. Точки, лежащие между двумя пиками, принадлежат к одной из них, а точки, расположенные вне пиков, — к другой. Выполненное разделение точек на схеме Рыбинского водохранилища (рис. 106) показывает, что с помощью этого метода, не задаваясь никакими предварительными условиями, удалось выделить весной в рассматриваемом водоеме речные водные массы и водную массу центральной части. Сопоставление положения границ раздела водных масс, выделенных методом оптимального цикла и другими способами, показало, что для данной съемки они близки друг к другу. Следовательно, дальнейшая разработка этого метода открывает широкие перспективы использования его для выделения водных масс во внутренних водоемах.

Из указанных методов при выделении водных масс в волжских водохранилищах нами преимущественно использовался первый, т. е. водные массы выделялись по градиентам отдельных характеристик, а в сложных случаях и для проверки статистической достоверности результатов применялся статистический метод.

Глава IV

ФОРМИРОВАНИЕ ВОДНЫХ МАСС В ВОДОХРАНИЛИЩАХ РАЗЛИЧНОГО ТИПА

Анализ физических и химических показателей водных масс водохранилищ волжского каскада указывает на то, что решающую роль в их формировании играют воды рек, за счет которых происходит наполнение и питание водохранилищ. Поступая в водоем замедленного водообмена, они продолжительное время сохраняют свои особенности. По ряду наиболее репрезентативных показателей с помощью изложенных методов можно легко установить их распределение в пределах того или иного водоема. Воды, за счет которых происходит наполнение и питание водохранилищ, мы называем исходными водными массами.

В результате смешения исходных водных масс друг с другом и с водами водохранилища, а также в процессе взаимодействия их с дном водоема и атмосферой они настолько теряют свои первоначальные свойства, что образуют новую водную массу, существенно отличающуюся от исходной.

Наполнение водохранилищ волжской системы происходит в основном в период весеннего половодья. Половодье рек волжского бассейна, самого крупного на земном шаре равнинного бассейна, зависит исключительно от таяния снежного покрова. Поскольку бассейн простирается по меридиану с севера на юг примерно на 15 широты, сроки наступления таяния снега на отдельных его участках разные. Кроме того, в ровных лесистых местностях северной части бассейна снег тает медленнее, чем в волнистых степных. Все это приводит к тому, что отдельные части волжского бассейна в отношении хода половодья находятся в различных условиях. Так, северо-восточные районы (Кама, Вятка) многоводны, с продолжительным ровным половодьем, тогда как юго-западные (Ока) маловодны и отличаются коротким и бурным половодьем (Семенов-Тянь-Шанский, 1925).

В более южных районах, где снег лежит зимой тонким слоем и рано тает, стока в Волгу практически нет и половодье приходит сверху. На характер половодья и состав его вод оказывает влияние и то обстоятельство, что речные истоки в северных, лесистых частях бассейна в большинстве случаев заболоченные, тогда как в более южных, лесостепных районах они овражные.

Следовательно, при изучении формирования водных масс водохранилищ волжского каскада первостепенное значение имеет исследование физических характеристик и химического состава паводковых вод водосбора, поскольку именно эти воды являются для ряда водохранилищ исходными.

Иваньковское и Угличское водохранилища

Основная роль в формировании водных масс Иваньковского водохранилища принадлежит рекам Волге и Тверце. Эти реки дают 82% от объема годовой приточности. Преобладающая роль их в формировании водных масс водохранилища особенно хорошо видна весной.

В весенний период верхний участок водохранилища до дер. Единово заполнен водами этих рек. К середине июня они уже сильно прогреты и в отдельные годы средняя температура на русловых вертикалях достигает 23 (Рутковский, 1964). Наличие проточности обеспечивает на указанном участке водохранилища полную однородность вод по вер-

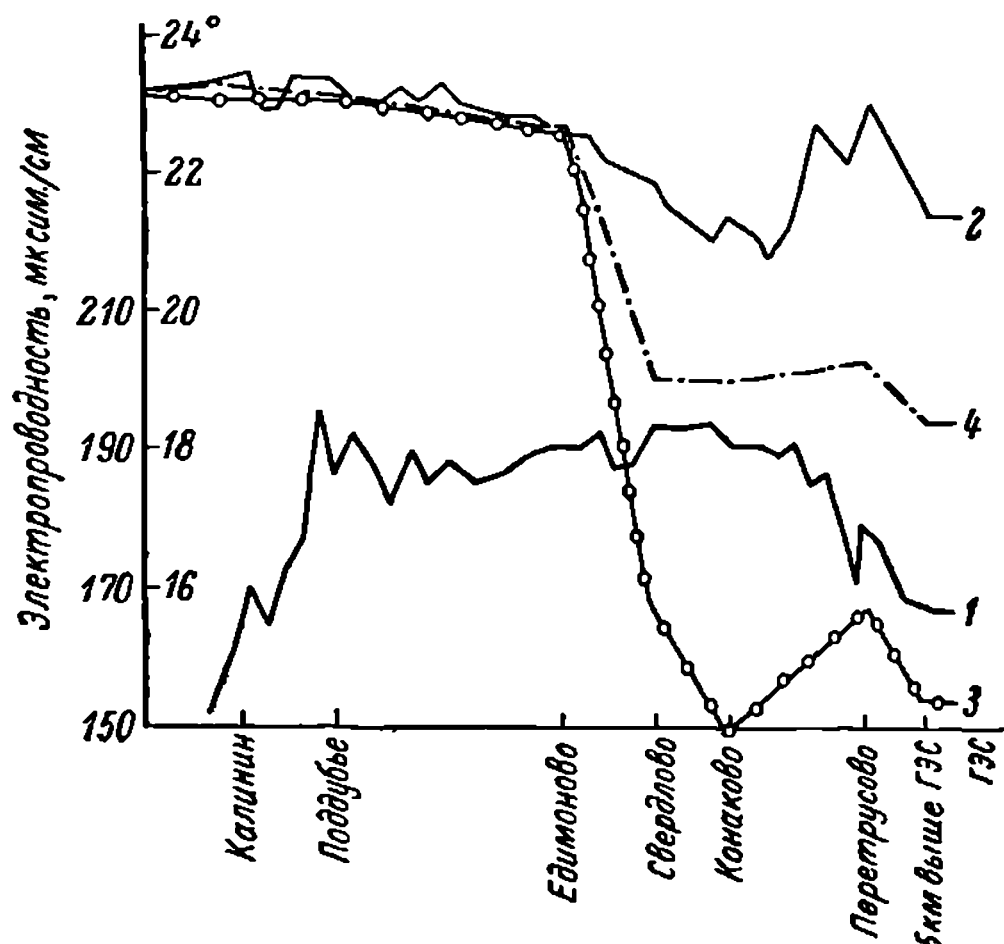


Рис. 107. Ход характерных температур и электропроводности в Иваньковском водохранилище 13—17 июня 1961 г. (по В. И. Рутковскому).

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

тикали. В отличие от температуры электропроводность воды по длине рассматриваемого участка испытывает существенные изменения, особенно заметные между г. Калининым и дер. Поддубье. В этом районе, вероятно, под влиянием сточных промышленных вод электропроводность заметно повышается. Ее значения увеличиваются от 150 мксим./см выше г. Калинина до 190 мксим./см в районе дер. Поддубье, причем повышение электропроводности происходит во всей толще воды от поверхности до дна. Таким образом, уже верхний участок Иваньковского водохранилища от г. Калинина до дер. Единово весной заполнен водной массой, отличающейся от исходных вод Волги и Тверцы повышенной электропроводностью.

При дальнейшем перемещении этой водной массы к плотине характеристики ее меняются. Прежде всего на участке дер. Единово — пос. Свердлово происходит резкое понижение температуры (рис. 107). Еще при изучении температурного режима Рыбинского водохранилища В. И. Рутковский (1963а) отметил, что наиболее резкое изменение температуры весной свойственно участкам водоема, на которых происходит смешение теплых речных вод с холодными водами центральной части.

П нее нами Рыбопромысловый атлас Рыбинского водохранилища, 1963, Бу ори н, 1964, 1965б) и К. К. Эдельштейном (1965а) было показано, что резкое изменение характеристик свойственно зоне соприкосновения различных водных масс. Наиболее вероятно, что и в данном случае между дер. Единово и пос. Свердлово проходит зона смещения теплых, относительно высокоминерализованных вод конца половодья с холодными водами более ранней стадии его (рис. 108). Понижение температуры воды на поверхностных и придонных горизонтах продолжается и на участке от пос. Свердлово до г. Конакова, а после некоторого повышения ее в районе дер. Перетрусово прослеживается до плотины Ивановской ГЭС.

Изменения электропроводности носят иной характер. В зоне резкого изменения температуры она не испытывает больших колебаний и средние

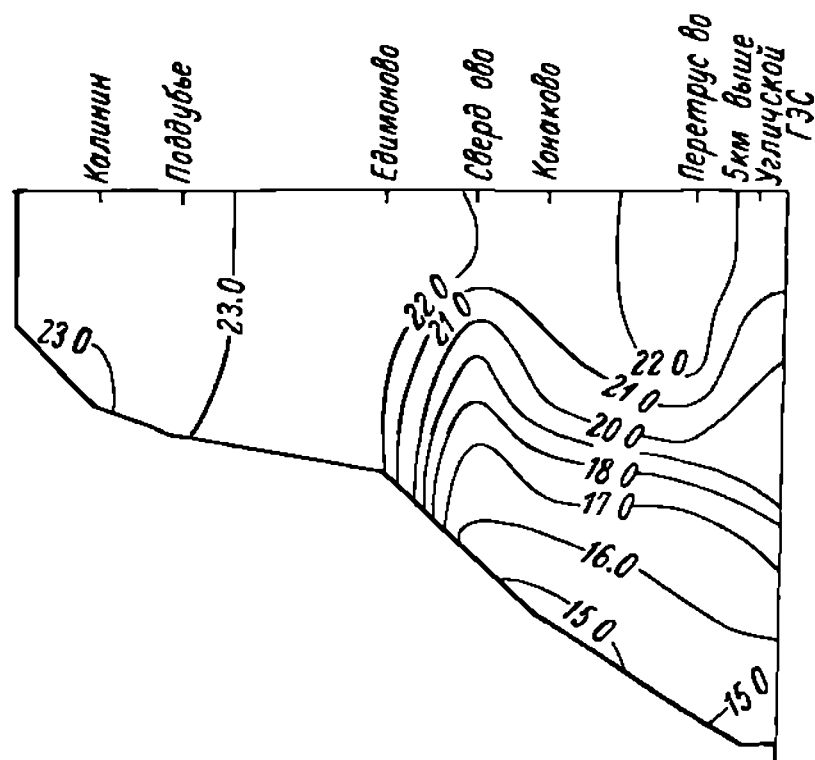


Рис. 108. Распределение температуры воды в Ивановском водохранилище 13-17 июня 1961 г. (по В. И. Рутковскому, 1964).

значения ее остаются на уровне 190 мксим. см. Но наблюдаются заметные различия в минерализации вод по вертикали, причем электропроводность поверхностных вод несколько выше, чем придонных. Такое распределение электропроводности подтверждает предположение о том, 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 перемещении натекает на относительно холодные и

менее минерализованные придонные воды. Последние представляют собой частично трансформированные воды весеннего половодья, температура которых равна 15—16, а электропроводность 170—180 мксим./см.

Присутствие этих водных масс в водохранилище объясняется следующим образом. В период весеннего наполнения водоема в него поступают слабоминерализованные воды половодья. Температура их обычно колеблется около 11 (Рутковский, 1964; Буторин, 1965б). При небольшом объеме водохранилища они 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 половодья в водохранилище поступают более прогретые воды, минерализация которых заметно увеличивается. Постепенно вытесняя воды начальной фазы половодья из верхнего речного участка водохранилища, они и формируют здесь рассмотренную нами водную массу, которая, имея значительно более высокую температуру, даже при более высокой электропроводности натекает на воды приплотинного участка. В зоне же соприкосновения с последними образуются большие градиенты характеристик.

Натекание прогретых вод речного участка водохранилища на более холодные воды приплотинной части происходит настолько интенсивно, что к середине июня они в поверхностных горизонтах обычно достигают плотины. Положение изотерм (см. рис. 108) показывает, что в русловой

части водохранилища на участке от г. Конакова 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 сброса холодных вод через ГЭС и трансформации объем их систематически уменьшается и зона больших градиентов характеристик постепенно перемещается к плотине.

Таким образом, по продольной оси Ивановского водохранилища весной отчетливо выделяются две различные водные массы: более теплые и минерализованные воды речного участка и относительно холодные, с более низкой электропроводностью воды половодья, заполняющие глубоководную приплотинную часть водоема. Пространственное распределение их в водохранилище можно представить по расположению изотерм на рис. 108, а формирование связано с трансформацией волжской воды в водоеме.

До последнего времени трудно было решить, сохраняется ли различие вод водохранилища в летне-осенний период. С одной стороны, при мелководности водоема, интенсивном водообмене и однородности вод, поступающих в него, такие различия маловероятны. 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 августа 1966 г. Полученные данные показывают, что и летом температура и особенно электропроводность в Ивановском водохранилище по ходу вод заметно меняются, причем характер изменения их остается таким же, как и весной.

В августе 1966 г. в водохранилище поступала волжская вода со средней температурой в русле 20.4 и электропроводностью около 250 мксим./см. При движении ее по речному участку водохранилища температура сначала непрерывно повышалась и в районе дер. Поддубье 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 же образом изменялась и электропроводность: сначала наблюдалось заметное увеличение ее, а после достижения максимума в районе дер. Поддубье отмечалось первоначально резкое до дер. Единово, а ниже ее более медленное понижение до самой плотины. Как и весной, наиболее резкое увеличение электропроводности летом наблюдается ниже г. Калинина. Изменение температуры и электропроводности в водохранилище происходит одновременно во всей толще воды, и при этом различия в значениях каждой из этих характеристик по вертикали невелики.

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

В Угличском водохранилище, особенно весной, также наблюдаются некоторые различия в температуре и электропроводности вод по длине водоема, но на основе этих характеристик выделить в нем различные водные массы не представляется возможным. Хотя в русловой части приплотинного участка водохранилища весной отмечается температурное расслоение водной толщи, но она представляет собой единую водную массу. Сопоставление характеристик вод приплотинных участков Ивановского и Угличского водохранилищ показывает, что как весной, так и летом

они близки между собой. Следовательно, в Угличском водохранилище происходит лишь незначительная трансформация вод, поступающих из Иваньковского водохранилища, которая выражается в основном в повышении их электропроводности.

Шекснинское водохранилище

Большую часть площади и объема Шекснинского водохранилища занимает Белое озеро, воды которого являются исходными для шекснинской части водоема. В связи с этим характеристику водных масс водохранилища целесообразно начать именно с вод Белого озера. Для весеннего периода М. Г. Ершовой (1968) в нем выделены три водных массы (рис. 109).

Узкой полосой вдоль северного побережья озера растекается весенняя водная масса рек Ковжи и Кемы (B_K). Эти маломинерализованные, относительно теплые и сильно окрашенные воды вклиниваются в Белое озеро, следуя общему направлению русел рек, из которых они поступают. У южного берега озера располагается весенняя водная масса рек этого побережья ($B_{\text{ю}}$) с характеристиками, близкими к водной массе Ковжи и Кемы. Поскольку формирование этой водной массы определяется стоком нескольких рек, впадающих в озеро перпендикулярно линии берега, ее граница с зимними водами озера проходит почти параллельно берегу, образуя изгиб лишь на том участке, где начинается бесприточный район побережья (см. рис. 109). Северо-восточная и центральная части Белого озера весной заняты зимними водами ($З_6$), которые в отдельных районах частично трансформированы. Наибольшая трансформация их наблюдается на участках соприкосновения с весенними речными водами. Зимние воды озера характеризуются низкой окрашенностью и повышенной электропроводностью. Общее представление об основных показателях водных масс Белого озера можно получить из табл. 78.

Т а б л и ц а 78

Пределы колебаний характеристик водных масс Шекснинского водохранилища
(по М. Г. Ершовой, 1968)

Водная масса	Индекс	Электропроводность, максим. см	НСО ₃ , мг-экв. л	Оптический показатель	Цветность, град.
Весенняя рек Ковжи и Кемы	B_K	50—60	0.60 0.70	от 0.500 до 0.520	100—120
Весенняя южного берега	$B_{\text{ю}}$	55—60	0.50—0.60	от 0.380 до 0.400	80—90
Зимняя белозерская . .	$З_6$	150 160	1.40 1.50	от 0.100 до 0.200	20—30
Летняя белозерская . .	$Л_6$	120 130	1.00—1.10	от 0.140 до 0.230	25—40
Весенняя шекснинской части	$B_{\text{ш}}$	120—140	1.10 1.20	от 0.240 до 0.400	50—100
Летняя шекснинской части	$Л_{\text{ш1}}$	150—200	—	от 0.240 до 0.320	40—60
	$Л_{\text{ш2}}$	135—150	—	от 0.280 до 0.420	50—80

Водные массы Белого озера в весенний период характеризуются однородностью показателей как по акватории, так и по глубине. Некоторая неоднородность вод по вертикали наблюдается лишь в зонах их смешения.

Водная масса шекснинской части водохранилища весной формируется в результате смещения зимних вод белозерского происхождения с весенними водами притоков. По длине шекснинского участка эта водная масса неоднородна по своим показателям. Так, электропроводность ее колеблется в пределах 120—140 мксим./см, а оптический показатель — в пределах 0.24—0.40 (Ершова, 1968). Такой широкий диапазон колебаний абсолютных значений показателей связан с тем, что не на всех участках процесс смещения вод происходит одинаково. Наиболее интенсивно он протекает в районах, примыкающих к устьевым участкам рек.

Значения характеристик весенней водной массы шекснинской части водохранилища зависят также от интенсивности водообмена. С уменьшением водообмена уменьшается и диапазон изменений основных характеристик водной массы. Так, если сопоставить значения их при одной и той же фазе половодья рек в конце мая 1964 г., когда из водохранилища было сброшено более двух третей объема его шекснинских вод, с величинами, полученными в конце мая 1965 г. при сбросе, равном одной трети этого объема, можно заметить, что в 1965 г. пределы изменения характеристик были меньше, чем в 1964 г.

Уже весной в Белом озере начинает формироваться белозерская летняя водная масса. Ее формирование идет за счет трансформации зимних вод, происходящей в результате смешения их с весенними речными водами, а также под влиянием метеорологических условий. Наиболее интенсивно формирование летней белозерской водной массы протекает

в районах, где располагаются зоны смешения зимних озерных и весенних речных вод. Из табл. 78 видно, что значения характеристик летней водной массы меняются в известных пределах, так как формирование летних вод происходит довольно длительно. Еще в конце июля можно выделить районы, где прослеживаются зимние белозерские и весенние речные воды. Обычно первые из них встречаются у северо-западного побережья и в центре озера, а вторые — у юго-восточного побережья.

Летняя водная масса Белого озера, как и зимняя, по своим характеристикам весьма однородна. При мелководности озера даже термическая стратификация ее — явление весьма редкое и различия в температурах воды поверхностного и придонного слоев невелики. Так, во время пятисуточной станции, проведенной 22—26 июля 1964 г. на глубине 4.5 м, максимальная разность температуры воды на поверхности и у дна в течение суток составляла лишь 1.8 (Ершова, 1968). Обычно прогрев и охлаждение происходит одновременно во всей водной толще.

К концу осени в летней водной массе Белого озера происходит окончательное выравнивание всех показателей по акватории, причем окрашенность ее несколько уменьшается (с 0.20—0.23 до 0.14—0.18 единиц оптического показателя). Это свидетельствует о том, что в течение летне-осеннего периода происходит постепенная трансформация самой летней белозерской воды.

Шекснинская часть водохранилища летом заполнена летней белозерской водной массой. Продолжительное пребывание этих вод в пределах

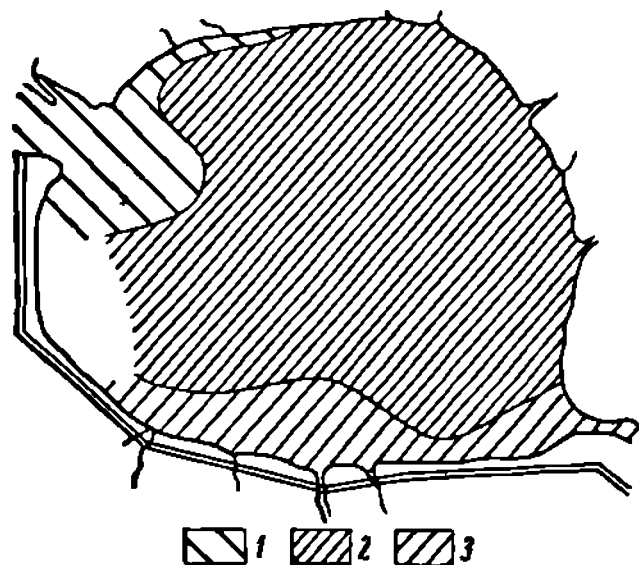


Рис. 109. Распределение водных масс в Белом озере 20—21 мая 1965 г. (по М. Г. Ершовой, 1968).

- 1 — весенняя водная масса рек Ковжи и Кемы;
- 2 — зимняя водная масса Белого озера;
- 3 — весенняя водная масса рек южного побережья.

шексинской части водохранилища в виду слабого водообмена в летний период приводит к их трансформации. Трансформация происходит под влиянием местного стока рек боковой приточности, метеорологических условий и некоторых других факторов. Влияние каждого из них на водную массу рассматриваемого участка водохранилища неодинаково, поэтому воды шексинской части водоема летом неоднородны. М. Г. Ершов (1968б) удалось выделить в ней две разновидности вод. Первая из них ($\Pi_{ш}$) занимает речной участок водохранилища от Белого озера до сизьменского расширения. Она формируется из белозерской летней водной массы и меженных вод рек, которые летом характеризуются повышенной минерализацией и пониженной окрашенностью. Но поскольку на этом участке водообмен замедлен, то полного перемешивания этих водных масс не происходит и в распределении их наблюдается пятнистость. Внутри каждой из них однородность показателей сохраняется, но в целом эти характеристики в известных пределах меняются (см. табл. 78). При интенсивном перемещении вод такой картины не наблюдается и трансформация водных масс происходит относительно равномерно от Белого озера до сизьменского расширения.

От сизьменского расширения до плотины белозерская летняя водная масса трансформируется меньше, чем на вышележащем участке. Это вторая разновидность летней водной массы шексинской части водохранилища ($\Pi_{ш}$), которая отличается от первой более низкой электропроводностью и повышенной цветностью (см. табл. 78). Кроме того, в ней из-за слабого водообмена отмечается стратификация температуры и кислорода.

Водная масса шексинской части водохранилища существует непродолжительное время, так как объем ее невелик по сравнению с Белым озером, поэтому в течение большей части года (осень, зима и весна после наполнения водохранилища) шексинская часть водоема является транзитным участком для вод белозерского происхождения.

Таким образом, и в Шексинском водохранилище в навигационный период отчетливо прослеживаются различные водные массы. Формирование их происходит в основном в самом водоеме. На водосборе водохранилища формируются лишь весенние речные воды, которые более или менее продолжительное время сохраняются в Белом озере. При незначительном объеме меженного стока рек боковой приточности, особенно в шексинской части водохранилища, речные воды не образуют соответствующих водных масс, а оказывают влияние лишь на трансформацию вод белозерского происхождения.

Рыбинское водохранилище

На примере Иваньковского и Шексинского водохранилищ четко прослеживается определяющая роль вод половодья в формировании водных масс этих водоемов. Именно этими водами каждую весну заполняются и другие водохранилища волжского каскада, а так как некоторые из них, например Рыбинское, характеризуются небольшой проточностью, то большая часть паводковых вод в таких водоемах задерживается почти на весь вегетационный период. Следовательно, из них и формируется водная масса собственно водохранилища. Кроме того, паводковые воды богаты биогенами и в значительной мере определяют ход биологических процессов в водохранилищах. В связи с этим при изучении вопроса о формировании водных масс водохранилищ важно иметь представление о физических свойствах и химическом составе паводковых вод водосбора. Это особенно необходимо для Рыбинского водохранилища, отличающегося большой площадью водосбора и значительным разнообразием ее почвенно-геологических и физико-географических условий.

Основным фактором, определяющим химический состав вод водосбора, являются его почвенно-геологические условия. Химический состав паводковых вод зависит главным образом от химического состава почвообразующих пород, их способности к растворению, а также от химического состава почвенных растворов (Воронков, 19516). Площади водосборов рек в бассейне Рыбинского водохранилища в значительной степени заболочены, облесены и обычно покрыты подзолистыми почвами. Наиболее растворимые соединения из этих почв уже выщелочены атмосферными водами, и в результате процесса оподзоливания поглощенные катионы поглощающего комплекса замещены ионом водорода при сопутствующем этому процессу разрушении и вымывании водой ненасыщенных основаниями поглощающего комплекса. В таких условиях процесс формирования химического состава воды выражен слабо и протекает только за счет растворения химических соединений, образующихся в результате постоянного выветривания почвообразующих пород и регенерации минеральных соединений из разлагающихся остатков органических веществ (Воронков, 19516).

Исследуя влияние почвенно-геологических условий на формирование химического состава поверхностных вод водосбора Верхней Волги, П. П. Воронков (19516) указывает, что паводковые воды формируют химический состав в результате растворения химических соединений, находящихся как на поверхности почвы, так и непосредственно в ней. При этом они разбавляют и сами почвенные растворы. К паводковым водам может добавляться и некоторая доля грунтовых вод, которые формируют свой химический состав на более глубоких горизонтах коры выветривания. Таким образом, главную роль в поверхностном стоке рассматриваемого бассейна играют почвенно-грунтовые воды.

Поскольку большая часть бассейна Верхней Волги и Мологи покрыта подзолистыми почвами с преобладанием суглинистых и супесчаных разностей, а в подзолистых почвах бассейна Шексны преобладают глинистые и суглинистые почвы, то в бассейне Рыбинского водохранилища могут формироваться лишь маломинерализованные почвенно-грунтовые воды. Паводковые воды, сформированные в условиях таких бассейнов, могут содержать в растворенном виде значительное количество окрашенных органических веществ гумусового происхождения. Повышение их минерализации может происходить за счет смешения с грунтовыми водами, которые вызывают не только местные изменения в химическом составе вод этих рек, но и в целом существенно влияют на него.

На химический состав поверхностных вод бассейна водохранилища в период половодья может оказывать влияние степень заболоченности водосбора и покрывающая его растительность. Большие площади заболоченных и лесных участков способствуют формированию маломинерализованных поверхностных вод с относительно большим содержанием ионов $\text{SO}_4^{''}$. Воды с водосборов, занятых папнями, отличаются повышенной минерализацией поверхностного стока и повышенным содержанием ионов HCO_3 (Воронков, 19516).

Для правильной характеристики исходных водных масс необходимо учитывать, что в ходе весеннего половодья химический состав поверхностных вод может существенно изменяться. В первой половине его минерализация воды обычно значительно ниже, а относительное содержание ионов $\text{SO}_4^{''}$ может быть выше, чем на спаде. Кроме того, не все реки, территориально близкие между собой, имеют одинаковый химический состав воды в период половодья, что связано с некоторым различием химического состава почво-грунтов и пород отдельных бассейнов.

Это можно проследить на примере Волги, Мологи и Шексны — основных рек, питающих Рыбинское водохранилище. Воды этих рек являются

Характеристика основного солевого состава волжских, воложских и шекшинских вод
(по А. П. Щербакову, 1950)

Дата	Волга				Молога				Шексна			
	Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺ мг-экв. л	HCO ₃ ['] мг-экв. л	SO ₄ ^{''} мг-экв. л	Ca ⁺⁺ + Mg ⁺⁺ мг-экв. л	HCO ₃ ['] мг-экв. л	SO ₄ ['] мг-экв. л	Ca ['] Mg ['] мг-экв. л	HCO ₃ мл-зл в л	SO мг-экв. л			
1939												
II	5.46	4.67	0.76	4.72	4.04	0.87	5.58	3.80	1.92			
III	3.34	3.02	0.38	3.68	3.07	0.68	5.43	3.61	1.77			
IV	1.20	0.95	0.30	4.12	3.27	0.84	—	—	—			
V	1.60	1.05	0.49	1.20	0.90	0.33	1.30	0.79	0.46			
VI	2.74	2.01	0.75	2.84	2.17	0.74	—	—	—			
VII	2.61	2.30	0.55	2.97	2.30	0.68	2.61	1.78	0.79			
VIII	3.25	2.78	0.38	3.11	2.48	—	2.12	1.60	0.53			
IX	3.24	2.76	0.38	3.67	2.82	0.80	—	—	—			
XII	4.20	3.55	0.76	—	—	—	3.17	2.60	1.12			
1940												
II	5.04	4.40	0.68	4.90	3.92	0.86	5.74	3.83	2.11			
IV	1.03	0.75	0.26	0.95	0.75	0.21	—	—	—			
V	1.23	0.83	0.39	1.41	0.95	0.40	1.54	1.02	0.51			
VI	2.48	1.95	0.49	2.79	1.87	0.86	—	—	—			
VII	2.50	2.05	0.43	3.30	2.42	0.78	2.63	1.86	0.71			
VIII	2.80	2.34	0.37	3.56	2.76	0.77	2.66	2.00	0.68			
IX	3.10	2.69	0.41	—	—	—	—	—	—			
XI	3.33; 3.07	2.72; 2.40	0.41; 0.57	—	—	—	—	—	—			
XII	—	—	—	2.36	1.50	0.74	2.71	1.55	1.15			
1941												
I	2.76	2.18	0.47	—	—	—	—	—	—			
II	3.30	2.72	0.46	4.00	3.18	0.72	5.88	3.37	1.88			
III	3.53	2.95	0.46	—	—	—	5.28	3.12	2.07			
V	1.40	1.05	0.22	1.40	1.03	0.35	1.69	1.07	0.50			

П р и м е ч а н и е. Данные за V 1941 для Шексны получены на ее участке у г. Череповца.

исходными для формирования водных масс водохранилища и данные по их химическим свойствам позволяют точнее выявить различия между ними, которые сохраняются и в водоеме (табл. 79 и 80).

Таблица 80

Характеристика цветности (в град. Сг-Со) волжских, моложских
шексинских вод
(по А. П. Щербакову, 1950)

	1939										1940	
	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	XII		II	IV
Волга . . .	20	15	66	83	71	58	55	40	23		23	45
Молога . .	35	21	20	130	71	70	40	32	—		50	54
Шексна . .	37	30	—	125	—	88	45		38		22	—

Продолжение

	1940							1941			
	V	VI	VII	VIII	IX	XI	XII	I	II	III	V
Волга . . .	60	50	47	40	28	37; 70	—	100	93	97	80, 91
Молога . .	93	70	45	35	—	—	145	—	72	—	72-150
Шексна . .	106	—	62	34	—	—	150	—	60	—	145

Из табл. 80 видно, что по общей минерализации воды рассматриваемых рек в общем сходны между собой. Это особенно заметно во время весеннего половодья, когда в реках наблюдается наименьшая концентрация солей. То же происходит и с общей жесткостью воды. Нарастание минерализации летом и осенью совершается одновременно во всех реках, но в Шексне оно идет медленнее, чем в Волге и Мологе. Наиболее отчетливо различие в минерализации вод этих рек отмечается зимой в период максимальных ее значений: наименьшая минерализация воды в это время наблюдается в Мологе, а наибольшая — в Шексне.

В период весеннего половодья воды Волги, Мологи и Шексны сходны между собой и по содержанию бикарбонатов, особенно Волга и Молога. Только в отдельные сезоны намечается незначительное преобладание их в воде Волги. Шексинская вода заметно беднее бикарбонатами, чем волжская и моложская. Более существенно различаются воды рассматриваемых рек по сульфатам. Разница в содержании сульфатов в воде Волги и Мологи невелика: в моложской воде их несколько больше, чем в волжской. Воды Шексны содержат большее количество сульфатов. Так, если весной в воде Волги и Мологи они составляют около 25% от общей суммы анионов, то в Шексне их около 35% (Щербаков, 1950). После половодья содержание сульфатов в шексинской воде увеличивается быстрее, чем в Волге и Мологе, и к зиме воды Шексны в несколько раз богаче сульфатами, чем волжские и моложские. Вообще, как показали исследования П. П. Воронкова (1951а), наиболее резкие сезонные колебания солевого состава вод свойственны именно Шексне.

Воды всех трех рек имеют довольно высокую цветность, но воды Мологи и Шексны по цветности заметно превосходят волжские (см. табл. 80). Это особенно заметно в период весеннего половодья и во время осенних паводков.

Таким образом, воды трех основных рек, питающих Рыбинское водохранилище, по химическому составу заметно различаются. Прежде всего

это касается солевого состава и цветности. Общее содержание солей в воде Волги и Мологи летом и осенью выше, чем в Шексне, а зимой и весной наоборот. Последовательность сезонного изменения общего соотношения содержания ионов в водах этих рек хорошо видна на рис. 91, составленном Ф. И. Безлером (1963). Как указывает этот автор, ввиду ограниченного количества наблюдений, по данным которых построены кривые, последние представляют ориентировочный ход содержания ионов, но характерные различия между показателями вод Волги, Мологи и Шексны по сезонам года на графике проявляются вполне отчетливо.

Особенности химического состава вод каждой реки складываются в процессе формирования стока на водосборе, отражающего физико-географические условия, а основные черты водных масс в том или ином сезоне определяются свойствами преобладающей генетической категории вод, принимавших участие в формировании стока (Воронков, 1951б, 1963). В соответствии с периодическим изменением питания реки в течение гидрологического года и различным участием поверхностно-склоновых, почвенно-грунтовых и грунтовых вод меняются во времени и свойства речных вод. За некоторым объемом воды с определенным комплексом характеристик следует другой, с иными характеристиками. Такие разнокачественные объемы вод одной и той же речной водной массы можно рассматривать как ее модификации. Подобными модификациями являются воды половодья, летней межени, дождевых паводков и зимней межени. Наиболее четко различие между ними проявляется на малых реках (Эдельштейн, 1965а).

На изменения свойств речных вод наряду с природными условиями заметное влияние оказывает и антропогенный фактор. Так, еще А.П. Щербаковым (1950) было отмечено влияние Иваньковского и Угличского водохранилищ на изменение свойств волжской воды. Зарегулирование стока Волги этими водохранилищами ослабило и сгладило резкие колебания в химическом составе речных вод и вызвало общий сдвиг в годовом цикле ряда элементов химического состава волжской воды. Все это указывает на то, что волжская вода при прохождении указанных водохранилищ частично трансформируется и при поступлении в Рыбинское водохранилище имеет характеристики, несколько отличные от наблюдающихся в естественных условиях реки. Вероятно, аналогичные явления происходят и в шекснинской воде после сооружения плотины у г. Череповца. Несмотря на изменения характеристик, мы для удобства не меняем наименования исходных вод и называем их по-прежнему волжскими, моложскими и шекснинскими.

Для определения доли участия исходных вод в формировании водных масс водохранилища в отдельные сезоны необходимо иметь данные о величине и колебаниях стока основных рек. Именно объем стока в совокупности с искусственным регулированием запаса воды в водохранилище определяет в нем соотношение объемов водных масс различного происхождения.

Нами установлено, что для Рыбинского водохранилища соотношение объемов речных водных масс в общих чертах аналогично соотношению притока с соответствующих участков бассейна. Это видно на примере формирования речных водных масс в водоеме весной 1961 и 1962 гг. Приток речных вод на день съемки в эти годы выражался следующими величинами (км³):

Бассейн	12 V 1961	12 V 1962	Изменение притока
Волжский	4 8	6.1	1.3
Моложский	3.3	4.7	1.4
Шекснинский	3.4	6.0	2.6

С увеличением притока весной 1962 г. увеличивался и объем речных водных масс в водохранилище. Если сопоставить их объем в процентах от общего объема водохранилища в эти же сроки, то получится следующая картина:

Водная масса	12 V 1961	12 V 1962	Изменение объема
Волжская	14	16	2
Моложская	12	13	1
Шекснинская	11	24	13

Таким образом, в указанные годы с увеличением притока увеличивался и объем речных водных масс в водохранилище, причем наблюдалось некоторое соответствие увеличения объема водных масс объему стока. Учитывая это, мы рассчитали объемы исходных водных масс, поступивших в водохранилище, на дату каждой синхронной съемки (табл. 81).

Т а б л и ц а 81
Уровень водохранилища и поступление исходных водных масс (в км³)
на даты синхронных съемок

Дата	Уровень водохранилища, м. абс.	Исходные водные массы		
		волжская	моложская	шекснинская
1960				
9 V	100.17	3.41	2.97	2.43
3 VI	100.51	0.77	0.63	0.91
28 VII	99.81	0.33	0.58	1.36
4 X	99.63	1.23	0.32	1.21
27 X	99.47	0.79	0.20	0.61
1961				
14—20 II	99.63	5.08	1.55	0.76
17—24 III	99.42	2.12	0.46	0.31
12 V	101.87	4.81	3.34	3.41
8 VI	102.11	1.53	2.24	3.35
3 VIII	101.81	0.75	0.72	1.81
10 X	101.28	0.53	1.51	2.90
13—15 XI	100.83	0.26	0.48	1.02
25 XII	99.67	0.69	0.45	0.64
1962				
30 I—7 II	99.28	0.72	0.34	0.45
29 III—6 IV	98.07	2.60	1.18	2.05
12 V	101.82	5.15	4.17	5.47
6 VIII	101.85	4.58	2.04	4.31
4 XI	101.31	2.66	1.51	3.25
1963				
30 I—6 II	99.45	2.91	1.24	1.14
18—20—IV	98.35	3.05	1.42	1.57
14 VI	100.50	2.54	1.89	2.43
3 VIII	100.14	1.54	0.62	1.01
4 IX	100.11	0.08	0.25	0.27
21 XI	99.21	0.34	0.80	1.09
26 XII 1963— 4 I 1964	98.62	0.33	0.38	0.71

Казалось бы, имея данные по стоку и уровню водохранилища, можно сравнительно легко определить участие каждой из рек в формировании водных масс водохранилища на любое число без проведения трудоемких синхронных съемок. Однако искусственное регулирование объема водо-

хранилища не позволяют сделать этого, так как нарушает естественное соотношение величин притока и объемов соответствующих речных вод в водоеме

Несоответствие объема водных масс в водохранилище объему стока рек особенно четко проявляется в период его наполнения и во время интенсивной сработки. Так, в апреле-мае 1960 г. при совпадении пика половодья в бассейне Волги с высокими расходами Рыбинской ГЭС волжские воды в значительном мере были сброшены в нижний бьеф и объем волжской водной массы в водоеме, несмотря на наибольший приток, оказался наименьшим по сравнению с объемом моложских и шекснинских вод. Весной 1961 г. аналогичное несоответствие между объемом притока и водной массой в водохранилище отмечалось в шекснинском бассейне.

Еще более яркий пример влияния искусственного регулирования объема водохранилища на формирование водных масс дает зима 1960/61 г. В этом сезоне волжский бассейн дал 70%, а моложский только 20% общего притока в водохранилище. Хотя основная часть волжских вод поступила в водоем в декабре и январе, объем волжской водной массы, по данным съемки 14-24 февраля, составлял лишь 10% от общего объема водохранилища, а объем моложских вод равнялся 15%.

В данном случае причиной несоответствия объема притока волжских вод объему сформированной этими водами водной массы явилось повышение сбросов Угличской и Рыбинской ГЭС в декабре и январе при низком уровне водохранилища. Большая часть волжских вод при этих условиях прошла через Рыбинское водохранилище транзитом и была сброшена в нижний бьеф, тогда как моложские воды, подпертые мощным волжским потоком и водами центральной части водоема, практически полностью в нем аккумуляровались. В результате 5.1 км³ волжских вод, поступивших в водоем к середине февраля, дали водную массу объемом 1.7 км³, а 1.6 км³ моложских вод сформировали водную массу большого объема 2.4 км³.

Если учесть, что и соотношение исходных водных масс, поступающих в водохранилище, от съемки к съемке существенно меняется (см. табл. 81), то различное участие каждой из них в формировании водных масс Рыбинского водохранилища становится очевидным. В маловодные годы весной объем волжских, моложских и шекснинских вод, поступающих в водохранилище, практически одинаков, а в многоводные заметно преобладают волжские воды. Летом наблюдается обратная картина: как в маловодные, так и в многоводные годы волжские воды по объему заметно уступают моложским и особенно шекснинским. Такое соотношение объема вод, поступающих в водохранилище, сохраняется и осенью. В зимний период резко увеличивается поступление волжских вод. Зимний сток Волги превышает сток моложских и шекснинских вод, взятых вместе.

Таким образом, водная масса центральной части водохранилища весной формируется почти при равномерном участии всех трех потоков, летом и осенью в основном за счет вод Шексны, а зимой преимущественно за счет волжских вод. В связи с сооружением плотины у г. Череповца и зарегулированием Шексны сезонное распределение ее стока изменится и по характеру, вероятно, будет близким к волжскому.

Существенные различия в физических и химических характеристиках вод отдельных участков Рыбинского водохранилища позволяют выделить в нем четыре основные разновидности водных масс: волжскую, моложскую, шекснинскую и центральной части водоема. С течением времени и в процессе перемещения водных масс в пределах водохранилища характеристики их несколько меняются, но различия между водными массами сохраняются в течение всего годового цикла. Данные табл. 82 показывают, что характеристики и сезонные изменения их в волжской,

Предельные значения температуры и электропроводности водных масс
в Рыбинском водохранилище за период 1960—1964 гг.

Водная масса	Весна		Лето	
	температура °С	электропро- водность мксим /см	температура, °С	электропро- водность мксим. см
Волжская	7.2 9 2	105 137	17.1 23 2	150—206
Моложская	8 1 12 4	86 120	17.8 23 6	147—206
Шекснинская	3.1 10.8	68—124	16 8—23 5	130—167
Центральной части	2.1 6.4	192 292	17 3—23 6	143—188

Продол ение

Водная масса	Осень		Зима	
	температура, °С	электропро- водность мксим. см	температура °С	электропро- водность, мксим. см
Волжская	1.0—6.6	172—272	0.0—0.5	212 440
Моложская	0.8—5.2	166—270	0.2 2.5	208—326
Шекснинская	0.0 5.0	148 222	0.4 1.7	202—311
Центральной части	0.0 5.2	142—174	0.2—1.7	146—222

моложской и шекснинской водных массах близки к таковым в водах соответствующих рек, а в центральной части водохранилища резко отличаются от них.

Различие между водными массами водохранилища особенно хорошо заметно ранней весной, когда идет наполнение водохранилища. Во время весеннего половодья в моложской и шекснинской водах наблюдается наименьшая концентрация солей, в то время как в водной массе центральной части водохранилища она имеет максимальные значения. В связи с этим электропроводность водной массы центральной части водохранилища весной обычно в два раза выше, чем волжской, и более чем в два раза выше, чем моложской и шекснинской. Последние по электропроводности в весенний период сходны между собой, но в моложской водной массе она несколько выше, чем в шекснинской.

К концу весеннего периода водная масса центральной части водохранилища постепенно вытесняется волжской, моложской и шекснинской водами и частично перемешивается с ними, но в первой половине июня различие характеристик водных масс полностью сохраняется.

Летом различие в электропроводности водных масс заметно уменьшается. Это связано с одновременным нарастанием минерализации волжской, моложской и шекснинской водных масс и уменьшением ее в водах центральной части водохранилища. Наиболее интенсивная минерализация в переходный период от весны к лету идет в моложской водной массе, поэтому летом она выделяется несколько повышенной электропроводностью.

Осенью различие в электропроводности водных масс снова увеличивается. В волжской, моложской и шекснинской водных массах продолжается ее нарастание, а в водах центральной части водохранилища она понижается и в этом сезоне достигает минимальных значений. Наиболее высокой электропроводностью осенью отличаются волжская и молож-

ская водные массы. Электропроводность шекснинской воды хотя и увеличивается по сравнению с летом, но заметно ниже волжской и моложской.

В течение зимы происходит нарастание минерализации одновременно во всех водных массах, но в шекснинской и в водах центральной части водохранилища оно идет медленнее, чем в волжской и моложской. В связи с этим зимой сохраняется в общих чертах характер распределения электропроводности предшествующего сезона.

Подобная картина наблюдается и в отношении гидрокарбонатов. По максимальному содержанию гидрокарбонатов, как и по электропроводности, весной выделяются воды центральной части водохранилища. Наиболее бедна гидрокарбонатами в этом сезоне шекснинская водная масса. Летом содержание гидрокарбонатов выравнивается и по этому показателю водные массы сходны между собой. Несколько повышенным содержанием гидрокарбонатов отличается лишь моложская водная масса. Такое соотношение в содержании гидрокарбонатов сохраняется и осенью. Однако, если в волжской и моложской водных массах оно заметно увеличивается, то в водах центральной части водохранилища понижается. Наибольшее содержание гидрокарбонатов осенью наблюдается в волжской и моложской водных массах, а наименьшее — в водной массе центральной части водохранилища. Зимой содержание гидрокарбонатов постепенно нарастает, но наиболее бедной ими к концу зимы остается центральная часть водохранилища.

Существенные различия в течение года прослеживаются и в жесткости различных водных масс. Весной наибольшей жесткостью отличаются воды центральной части водохранилища. По этому показателю они почти вдвое превышают волжскую, моложскую и шекснинскую водные массы. Из них несколько большей жесткостью в этом сезоне отличается волжская водная масса, а наименьшей — шекснинская. Нарастание минерализации речных водных масс в летний период сопровождается повышением их жесткости, при этом наиболее интенсивно оно идет в шекснинской и моложской водных массах. Все это приводит к тому, что летом по жесткости водные массы водохранилища мало различаются между собой.

Если от лета к осени жесткость волжской и моложской водных масс продолжает увеличиваться, а шекснинской практически не меняется, то воды центральной части водохранилища становятся несколько мягче, чем в предшествовавшем сезоне. Зимой жесткость водных масс, как правило, увеличивается, но общее соотношение ее значений между отдельными водными массами сохраняется. Таким образом, весной наиболее мягкими являются шекснинская и моложская водные массы, особенно первая из них, а наиболее жесткими — воды центральной части водохранилища, осенью и зимой — наоборот.

Интересно также сопоставить водные массы по их температуре, цветности и прозрачности. Оказывается и по этим характеристикам в отдельные сезоны водные массы заметно различаются между собой. Так, весной воды центральной части значительно холоднее других водных масс водохранилища. Наиболее теплой в этом сезоне является моложская водная масса. Летом значения температуры водных масс сходны между собой, а осенью наиболее быстро выхолаживаются шекснинская и моложская водные массы. Зимой температура речных водных масс практически одинакова и близка к 0°, воды центральной части водохранилища заметно теплее речных.

По цветности моложская и шекснинская водные массы заметно превосходят волжскую и особенно воды центральной части водохранилища. Во время весеннего половодья первые две водные массы окрашены значительно сильнее последних. Летом цветность моложской и шекснинской вод заметно уменьшается, и по этому показателю они близки к волжской

водной массе. Наиболее низкой в этом сезоне остается цветность вод центральной части водоема. Осенью водные массы водохранилища по цветности близки между собой, а зимой цветность шекснинской, моложской и особенно волжской водных масс заметно увеличивается и снова наименьшее цветной остается водная масса центральной части водохранилища.

Обратная картина наблюдается в отношении прозрачности водных масс. Наиболее высокой прозрачностью отличаются воды центральной части водохранилища. Повышенная прозрачность вод центральной части водохранилища сохраняется в течение всего весенне-летнего периода и лишь во время осенних штормов она снижается до уровня прозрачности речных водных масс. Прозрачность волжской, моложской и шекснинской водных масс в течение года сходна и имеет наименьшие значения в весенний период.

Таким образом, основные характеристики водных масс Рыбинского водохранилища существенно различаются между собой. Это касается прежде всего солевого состава, температуры, цветности и прозрачности вод. Так, общее содержание солей в шекснинской и моложской водных массах в весенне-летний период ниже, а в осенне-зимний выше, чем в водной массе центральной части водохранилища. Волжская водная масса по солевому составу занимает промежуточное положение между шекснинской и моложской, с одной стороны, и водной массой центральной части водохранилища с другой. Последовательность сезонного изменения характеристик водных масс рассмотрена нами ранее (Буторин, 1966а).

Горьковское водохранилище

Водные массы Горьковского водохранилища формируются из вод Рыбинского водохранилища и стока притоков. Остальные составляющие приходной части водного баланса ничтожно малы и не оказывают существенного влияния на формирование водных масс водоема. По расчетам К. К. Эдельштейна (1965а), воды Рыбинского водохранилища в летне-осенний период составляют 70—80% общего притока в Горьковское водохранилище, а зимой достигают 90%. Следует отметить, что регулирование стока Рыбинским водохранилищем проявляется не только в перераспределении его по сезонам года, но и в значительном внутригодовом выравнивании большинства физических и химических характеристик вод.

Воды Рыбинского водохранилища, сбрасываемые в Горьковское водохранилище, формируются преимущественно из волжской водной массы и вод центральной части. Доля участия их в формировании сбрасываемых вод в отдельные сезоны года различна. Так, весной и в период интенсивной сработки водохранилища зимой значительную часть вод, сбрасываемых в нижний бьеф Рыбинского гидроузла, составляют волжские воды. В летне-осенний период доля их резко уменьшается и приплотинный участок Рыбинской ГЭС заполняется преимущественно водами центральной части водохранилища.

Водная масса, поступающая из Рыбинского водохранилища в Горьковское, отличается большой однородностью как по электропроводности, так и по другим характеристикам, особенно по температуре. Материалы синхронных съемок и специальные наблюдения А. С. Литвинова (1965) показали, что температура водной массы верхнего бьефа Рыбинской ГЭС изменяется в относительно небольшом диапазоне (табл. 83).

Из табл. 83 видно, что даже весной лишь на некоторых вертикалях наблюдается незначительное температурное расслоение водной толщи. Наиболее ярко выраженный слой температурного скачка отмечается в северо-западной части участка на глубине 1.4 м.

Вертикальное распределение температуры воды (°С) в верхнем бьефе
Рыбинской ГЭС 22 мая 1962 г.
(по А. С. Литвинову, 1965)

Н мер- стидий	Глубина, м	Горизонт, м								
		поверх- ность	1	2	3	5	7	10	15	дно
16	2.8	10.6	10.5	10.5	—	—	—	—	—	10.4
17	5.5	10.4	10.4	10.2	9.9	8.5	—	—	—	8.6
18	7.0	10.2	10.0	10.0	10.0	8.8	—	—	—	8.9
19	22.0	11.0	10.6	10.1	9.4	8.4	7.8	7.6	7.6	7.6
20	8.2	11.5	11.5	10.9	10.0	9.1	8.7	—	—	8.6
21	5.1	11.6	11.5	11.4	11.0	—	—	—	—	9.6
22	2.8	11.0	13.9	10.5	—	—	—	—	—	10.5
6	2.4	10.4	10.4	10.4	—	—	—	—	—	10.4
7	8.6	9.3	9.3	9.3	9.3	9.2	8.8	—	—	8.3
8	15.0	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.3	9.0	—	8.7
9	7.7	9.9	9.9	9.9	9.8	9.8	8.6	—	—	8.6
10	2.7	11.6	11.6	11.6	—	—	—	—	—	11.4

В летний период при общем повышении температуры воды происходит дальнейшее выравнивание ее по акватории и глубине. Так, в конце июня вертикальное расслоение водной толщи практически отсутствует. В большинстве случаев в поверхностном слое температура воды лишь на 0.1—0.5° выше, чем в придонном, а в прибрежье с глубинами 4 м отмечается гомотермия. Такая картина в распределении температуры воды наблюдается и в период выхолаживания водной толщи, которое протекает довольно равномерно.

Как указывает М. А. Фортунатов (1959), водам верхнего бьефа Рыбинской ГЭС свойственна также наименьшая изменчивость окрашенности по сравнению с другими районами водоема.

Отмеченные особенности водной массы верхнего бьефа Рыбинской ГЭС сохраняются и в нижнем бьефе. По наблюдениям К. К. Эдельштейна (1965б), электропроводность этих вод у Рыбинска изменяется от 130 до 240 мксим./см. Соответственно невелики здесь и колебания щелочности, жесткости и рН воды (табл. 84). Наличие постоянного стокового течения (Буторин, 1958в, 1963а) поддерживает однородность физико-химических характеристик водной массы, поступающей из Рыбинского водохранилища, на протяжении всей речной части Горьковского водохранилища. Так, в районе г. Кинешмы наибольшие разности температур не превышают 1°, а чаще всего составляют 0.5—0.6° (табл. 85). Изменения электропроводности также невелики — не более 5—8 мксим./см (Эдельштейн, 1965б).

Сопоставляя данные табл. 84 и 85, можно заметить, что в летне-осенний период в речной части Горьковского водохранилища сохраняется постоянство физико-химических свойств водной массы. Это связано прежде всего с регулирующим влиянием Рыбинского водохранилища.

Помимо пониженной внутригодовой изменчивости физико-химических характеристик, водная масса, поступающая из Рыбинского водохранилища, отличается от речных вод в естественных условиях значительным смещением экстремальных значений показателей в годовом цикле. Так, наибольшие значения электропроводности, щелочности и жесткости наблюдаются в начале весны, а минимальные — в летне-осенний период. Заметно отличается эта водная масса от остальных исходных вод по температуре особенно весной, когда она значительно холоднее их.

Некоторые характеристики водной массы Рыбинского водохранилища
у г. Рыбинска
(по К. К. Эдельштейну, 1965б)

Дата	Темпера- тура воды, С	Прозрач- ность, см	Цветность, град. Сг-Со	рН	Электропро- водность, мксм. см	НСО ₃ мг-экв./л	Са ⁺⁺ + Mg ⁺⁺ мг-экв. л
1961							
1 VI	11.3	—	—	—	156	—	—
28 VI	16.9	—	—	—	175	—	—
11 VII	18.0	80	55	—	162	—	—
23 VII	20.0	110	50	—	156	—	—
31 VII	21.0	95	35	—	157	—	—
29 VIII	15.9	—	—	—	157	—	—
1962							
15 VI	14.1	—	65	7.8	194	1.54	1.80
18 VII	18.5	110	45	7.8	147	1.25	1.62
3 VIII	17.1	—	—	—	144	—	—
10 VIII	16.6	—	—	—	145	—	—
21 VIII	15.7	—	—	—	152	—	—
28 VIII	14.7	100	55	7.6	139	1.13	1.51
14 IX	11.4	90	—	—	133	0.83	1.46
17 X	5.1	40	58	7.4	149	1.15	1.58
1963							
2 II	0.0	—	80	7.0	196	—	—
27 III	0.0	—	85	6.9	205	—	—
3 V	6.4	—	55	7.0	204	—	—
16 V	10.0	110	40	—	237	2.16	2.51
30 V	15.6	80	35	7.6	202	—	—
12 VII	17.0	60	45	7.4	147	—	—
24 VII	19.4	—	60	7.6	194	—	—
21 VIII	17.9	90	—	—	154	—	—
4 IX	19.5	—	55	—	166	—	—

Таким образом, воды Рыбинского водохранилища в пределах Горьковского весной представляют собой относительно холодную и высокоминерализованную водную массу повышенной цветности и прозрачности. В летне-осенний период минерализация и цветность их имеют наименьшие в году значения, а в течение зимы снова возрастают, достигая максимума весной. Воды боковой приточности Горьковского водохранилища составляют в среднем 36% приходной части его годового водного баланса. Роль их в формировании водных масс водоема от сезона к сезону меняется в широких пределах. Весной воды боковой приточности составляют до 60—75% общего притока, в летне-осенний период объем их уменьшается примерно вдвое по сравнению с весенним периодом, а зимой доля их участия сокращается до 10—15%. Как показали исследования К. К. Эдельштейна (1965а), из года в год наблюдается большая устойчивость в соотношении объемов отдельных исходных водных масс. Следовательно, степень участия вод различного происхождения в формировании водных масс Горьковского водохранилища в различные по водности годы относительно постоянна.

Воды боковой приточности значительно отличаются по физико-химическим свойствам от вод, поступающих из Рыбинского водохранилища (табл. 86). Анализ данных показывает, что по физическим и химическим свойствам воды рассматриваемых рек резко различаются между собой, особенно в летне-осенний период. Воды одних рек относительно высоко

Некоторые характеристики водной массы Горьковского водохранилища
в районе г. Кинешмы и летне-осенний период
(по К. К. Эдельштейну, 19686)

Дата	Темпера- тура воды, С	Прозрач- ность, см	Цветность град Сг Со	рН	Электропро- водность, мксим см	НСО ₃ , мг-экв л	Са ⁺⁺ Mg ⁺⁺ мг-экв л
1961							
2 VI	13.8				150	—	—
29 VI	19.7	80	55		196	—	—
9 VII	19.8	100	50		174	—	—
25 VII	22.0	100	60	—	176		—
29 VII	21.8		50	—	174		—
27 VIII	17.4				182	—	—
1962							
18 VI	14.8	80	45	7.6	185	1.50	1.66
29 VI	16.6	90	42	7.6	202	1.63	1.90
19 VII	20.2	80	45	7.4	166	1.36	1.80
1 VIII	18.0	70	50	7.8	150	1.04	1.75
11 VIII	18.1		—		155		—
20 VIII	16.8	—			166		—
31 VIII	15.1	110	55	7.7	164	1.25	1.82
12 IX	13.2	130	55	—	155	1.13	1.67
20 X	6.3	90	50		158	1.23	1.62
29 X	3.7	100	62	7.4	171	1.42	1.76

минерализованы и слабо окрашены, а воды других рек мало минерализованы и цветные. К первой группе рек относятся Унжа, Кострома и Мера, а ко второй Немда, Желвата и Моча.

Минимальная минерализация вод притоков водохранилища наблюдается весной во время половодья. Так, электропроводность вод Унжи в это время составляет 50—60 мксим./см, а Немды — 30 мксим./см. Цветность вод половодья указанных рек равна 80. В этот же период отмечаются минимальные значения рН (в Унже — 6.4, в Немде — 6.0). Близки к приведенным значениям и показатели вод р. Елнати во время половодья. Электропроводность их в приустьевом участке равна 58 мксим./см, цветность — 65, а рН — составляет 6.6 (Эдельштейн, 19656). Речные воды весной на 2—3 теплее вод, поступающих из Рыбинского водохранилища, и вод расширенной части Горьковского водохранилища.

Во время летней межени минерализация вод указанных рек возрастает и электропроводность их увеличивается до 250—320 мксим. см, содержание гидрокарбонатов и общая жесткость составляют 2.0—3.0 мг-экв./л, а цветность уменьшается до 20—40. Понижение цветности и небольшая мутность определяют относительно высокую прозрачность этих вод (порядка 120—155 см). Воды рек второй группы в это время отличаются пониженной минерализацией и повышенной окрашенностью. Электропроводность их вод составляет 120—180 мксим./см, общая жесткость и щелочность характеризуются величинами, не превышающими 1.5 мг-экв./л, а цветность достигает 60—100. В соответствии с этим прозрачность вод составляет 60—80 см.

В периоды дождевых паводков электропроводность и содержание основных ионов значительно понижаются, а цветность воды резко возрастает. В реках первой группы максимальные значения цветности во время паводков составляют около 120, в то время как в реках второй группы цветность достигает 180—190. В водах дождевых паводков содержатся большое

Некоторые характеристики основных речных вод во входных створах Горьковского водохранилища
(по К. К. Эдельштейну, 1968б)

Дата	Температура, °С	Прозрачность, см	Мутность, мг/л	Цвет воды	Цветность, град. Сг-Со	рН	Электр проводимость, мксм. см	НСО, мг-экв. л	Са ⁺⁺ + Mg ⁺⁺ , мг-экв. л
У н ж а									
1961									
2 VII	20.0	155	—	—	40	—	250	—	—
1962									
20 VI	16.8	120	2.5	XIX	42	7.2	233	1.81	2.17
22 VII	18.2	40	15.3	XX	85	7.3	184	1.71	1.95
3 IX	13.3	50	40.0	XVIII	120	7.3	137	1.02	1.59
22 X	1.1	80	10.6	XXI	100	7.3	187	1.46	2.04
1963									
6 II	0.0	—	—	—	20	6.8	319	—	—
29 III	0.0	—	—	—	25	7.1	350	—	—
27 IV	0.4	—	—	—	80	6.4	58	—	—
29 IV	2.0	—	—	—	95	6.4	52	—	—
20 V	17.3	80	7.9	—	85	7.0	104	—	1.19
2 VII	18.9	60	12.7	XXI	110	7.0	104	0.76	—
К о с т р о м а									
1962									
2 VIII	17.8	100	5.2	XXI	70	8.0	216	1.75	2.38
29 VIII	15.4	140	4.4	XVIII	55	7.9	303	2.92	3.56
19 X	4.6	60	11.6	бурый	82	7.8	287	2.78	3.07
1963									
17 V	16.8	80	—	—	80	7.4	150	1.32	1.73
28 VI	17.2	70	8.1	XVIII	120	7.3	179	—	—

Таблица 86 (прод. лжение

Дата	Температура, С	Прозрач- ность, см	Мутность, мг л	Цвет воды	Цветность, град. Сг-Со	рН	Электропровод- ность, мкс/см	НСО', мг-экв л	Са', мг эк л
Котгоросль									
1962				XVIII	65	7.3	207	2.06	2.35
18 VII	20.6	40	5.3	XVI	35	7.9	292	2.94	3.32
29 VIII	14.0	90	6.0	XVII	32	—	374	3.84	3.96
18 X	4.0	120	—	—	—	—	—	—	—
1963				—	18	7.0	521	—	—
3 II	0.0	—	—	—	25	7.0	546	—	—
27 III	0.0	—	—	—	30	7.6	278	2.30	2.62
16 V	17.5	80	7.9	XVII	60	7.4	202	—	—
27 VI	16.9	70	9.8	—	—	—	—	—	—
Немда									
1961				—	60	—	174	—	—
1 VII	20.3	—	—	XVIII	73	—	162	1.45	1.47
1962				XVI	150	6.9	98	0.80	1.06
19 VI	16.9	80	11.1	XI	150	7.0	71	0.50	0.84
20 VII	20.2	60	10.6	буро-желтый	144	6.9	110	0.84	1.22
2 IX	13.3	30	40.0	буро-коричневый	—	—	—	—	—
2 X	1.2	70	15.2	—	30	6.8	190	—	—
1963				—	20	6.6	204	—	—
6 II	0.0	—	—	—	80	6.0	30	—	—
1 IV	0.0	—	—	—	100	6.7	80	0.69	0.90
27 IV	0.2	—	—	—	120	6.8	83	—	—
19 V	18.7	70	5.7	XI	—	—	—	—	—
1 VII	18.8	50	10.4	—	—	—	—	—	—

количество взвесей, концентрация которых иногда превосходит 40 мг/л. Из-за повышенной цветности и мутности эти воды имеют буро-коричневый, буро-желтый и даже желтый цвет, а их прозрачность понижается до 30—40 см.

В зимний период минерализация речных вод достигает максимальных в году значений. Так, в водах Которосли зимой зарегистрирована электропроводность 546 мксим./см, в водах Унжи — 350 мксим./см, в водах Меры — 323 мксим./см. В водах Немды и Желваты максимальные значения ее соответственно равнялись 204 и 155 мксим./см. Различия зимних вод рек по цветности менее заметны, так как цветность в это время года мала. Воды первой группы рек имеют зимой цветность порядка 10—20, а воды второй группы рек — 20—30°.

Различия рассмотренных рек по физико-химическим свойствам их вод — высокоминерализованных и светлых и слабоминерализованных и цветных — были отмечены еще А. Ф. Никитиным (1905) и связаны с физико-географическими особенностями бассейнов этих рек. Очагами формирования стока рек первой группы являются возвышенности, где речная сеть глубоко врезана и дренирует несколько горизонтов грунтовых вод. Бассейны рек второй группы отличаются повышенной заболоченностью и более облесенные, чем водосборы рек первой группы.

Исходные водные массы, поступающие в Горьковское водохранилище, продолжительное время сохраняют присущие им особенности и заполняют вполне определенные районы водоема. В результате трансформации их в водохранилище образуется новая водная масса, собственно водохранилища, отличная по ряду показателей от исходных вод. Она имеет характер водной массы озерного типа со свойственными ей процессами накопления вещества и энергии, характерными для водоемов с замедленным водообменом (Россолимо, 1964).

Используя комплекс физических и химических показателей вод, наполняющих чашу водохранилища, К. К. Эдельштейн (1965а) выделил в нем четыре основных водных массы: волжскую, представляющую собой в основном воды Рыбинского водохранилища, воды Углича и Немды и собственно водохранилища. Водные массы различного происхождения в Горьковском водохранилище отчетливо прослеживаются в течение всего года, но границы между ними непостоянны и в зависимости от соотношения объемов водных масс и уровня водоема меняются по сезонам года (табл. 87).

Ранней весной речной участок водохранилища заполнен относительно холодной и высокоминерализованной волжской водной массой, поступающей из Рыбинского водохранилища. На участке Рыбинская ГЭС—Ярославль электропроводность ее порядка 180—200 мксим./см, а температура не превышает 1°. Под влиянием вод половодья Которосли и более мелких притоков волжская водная масса постепенно трансформируется, и от устья Которосли до костромского расширения электропроводность ее понижается до 160—180 мксим./см, а температура повышается до 7—10°. По ходу воды происходит дальнейшая трансформация этой водной массы водами половодья притоков и прежде всего Костромы. Ниже костромского расширения электропроводность ее равняется уже 105—120 мксим./см, а температура 4—6°. С такой электропроводностью и температурой при цветности 45—50° волжская водная масса поступает в озерную часть водохранилища, придерживаясь в основном затопленного русла Волги.

Больше половины озерной части водохранилища в первой половине весны занимают холодные зимние воды, которые представляют собой трансформированную волжскую водную массу. Температура этой водной массы значительно ниже температуры речных вод, а электропроводность в несколько раз выше. Так, в последней декаде апреля 1963 г. водная масса приплотинного участка водохранилища южнее сел. Сокольского

Характерные значения некоторых показателей основных водных масс
Горьковского водохранилища
(по К. К. Эдоштену, 1965а)

Водная масса	Модификация водной массы	Электропроводность, мксим./см	Цветность, град. Сг СО	Прозрачность, см
Волжская	Летняя	130 190	35 60	40—110
	Зимняя	200 240	70 80	—
	Весенняя	50 100	80 110	60—80
	Летняя межледная	220 250	40 50	120—155
Ужикская	Паводочная	140 180	90 120	40—60
	Зимняя	320 350	20 30	—
	Весенняя	30 80	80 100	60—70
Номдоская	Летняя межледная	150 180	60 80	70—80
	Паводочная	70 110	120 150	30—50
	Зимняя	190 210	20—30	—
Собственно водохранилища	Весенняя	80 120	35—50	80—100
	Летне-осенняя	140 180	40—60	100—200

имела температуру 0.0—0.2°, а электропроводность колебалась в пределах 195—218 мксим./см. Цветность этой водной массы составляла 50—55°. Даже севернее сел. Сокольского, в зоне соприкосновения с речными водами, электропроводность воды не падала ниже 155—165 мксим./см и температура оставалась близкой к 0.

В середине весны волжская водная масса, заполняющая речной участок Горьковского водохранилища, имеет наибольшую в году минерализацию и характеризуется высокой электропроводностью (235—247 мксим./см) и температурой 10—12°. Такие величины сохраняются до г. Ярославля. При дальнейшем продвижении этой водной массы к Горьковской ГЭС характеристики ее под влиянием вод боковой приточности, и прежде всего вод Которосли, начинают изменяться в сторону увеличения, и к костромскому расширению электропроводность становится равной 270—280 мксим. см, а температура 13.6—15.7°.

Ниже костромского расширения минерализация волжской водной массы с приближением к озерной части водоема заметно уменьшается, а температура несколько повышается. В середине мая волжская водная масса очень незначительно вклинивается в подную массу озерной части водохранилища. Аналогичная картина наблюдается и в отношении вод Номды и Ужик. Вся озерная часть водоема в это время заполнена весьма однородной водной массой, сформировавшейся преимущественно из вод полового дня Ужик и Номды. Она характеризуется низкими значениями электропроводности (50—90 мксим. см) и цветности (35—45). Таким образом, в условиях замедленного водообмена и интенсивного прогрева вод в озерной части водохранилища в результате трансформации вод, прежде всего Ужик и Номды, образуется новая водная масса. Она отличается от исходных водных масс не только значениями отдельных показателей, но и большей устойчивостью. В ряде случаев в ней наблюдается стратификация температуры, кислорода и pH.

В конце весны начале лета характеристики водной массы речной части водохранилища несколько отличаются от характеристик предшествующего периода. Электропроводность ее вблизи Рыбинского гидроузла уменьшается до 175 мксим./см, а по мере приближения к озерной части водохранилища снова увеличивается до 200 мксим./см. Цветность этих

вод равняется 50—70, а прозрачность составляет около 100 см. Воды Немды в это время существенно отличаются от волжских. Они более цветные и менее минерализованы. На востоке и юго-востоке юрьевецкого расширения волжские воды соприкасаются с водами Унжи, которые в районе сел. Николо-Макарова имеют электропроводность 250 мксим./см, цветность 40 и прозрачность 155 см.

Летом различие между характеристиками водных масс заметно уменьшается, но особенности их сохраняются. К этому времени все воды, связанные своим происхождением с речным половодьем, вытесняются из водохранилища или полностью трансформируются. В период летней межени основную роль в формировании водных масс Горьковского водохранилища играют воды Рыбинского водохранилища с электропроводностью около 150 мксим./см и средней температурой порядка 17°. Не испытывая значительной трансформации на подходе к Рыбинской ГЭС, эти воды сбрасываются через ее сооружения и поступают в Горьковское водохранилище. Летом они заполняют всю речную часть водоема. На всем ее протяжении электропроводность их меняется очень незначительно и равняется 160—180 мксим./см, а температура постепенно повышается. Изменение этих характеристик в поверхностном слое вдоль оси водохранилища летом 1962 г. представлено на рис. 110.

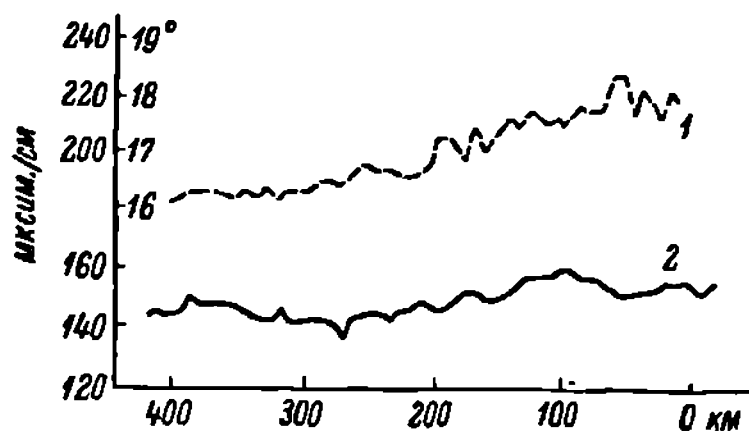


Рис. 110. Изменение температуры (1) и электропроводности (2) по длине Горьковского водохранилища летом 1962 г.

Прозрачность волжской водной массы летом колеблется в пределах 90—110 см, а цветность равна 50—60. Эти воды четко прослеживаются до устья р. Елнати, где проходит их граница с водной массой озерной части водохранилища.

Вся озерная часть водоема летом занята весьма однородной водной массой, по электропроводности и цветности близкой к волжским водам. Однако несмотря на одинаковые значения указанных показателей, эти воды различаются по ряду других признаков. Водная масса озерной части водохранилища по сравнению с волжской имеет более высокую температуру и повышенную прозрачность. Она характеризуется также температурной стратификацией.

Различия между водными массами водохранилища сохраняются и осенью. С понижением температуры воздуха и уменьшением поверхностного стока в речных водах усиливается влияние грунтового питания. Температура водных масс, особенно речных, быстро падает, и они становятся значительно холоднее волжских вод и водной массы озерной части водоема. Как и в предшествующие сезоны, речная часть водохранилища осенью заполнена волжскими водами. Электропроводность их по сравнению с летними значениями практически не меняется (150—170 мксим./см) и лишь несколько увеличивается с приближением к озерной части водоема, а температура не превышает 5.0—6.5°. Из приустьевых заливов притоков волжская вода вытесняется водами соответствующих рек, отличающихся более высокой минерализацией и низкой температурой.

Большую часть озерного участка водохранилища, как и в предшествующие сезоны, занимает озерная водная масса, которая по своим характеристикам близка к волжским водам, но отличается от них по цветности и температуре.

В зимний период почти все водохранилище заполнено волжской водной массой. Электропроводность ее порядка 180—207 мксим./см, цветность 67—80. Температура волжских вод по всей толще близка к 0. В приустьевых заливах притоков зимой наблюдается неоднородность вод по глубине. Так, в заливе р. Меры поверхностные слои до глубины 4—5 м представляют собой волжскую воду, а придонные — зимние воды Меры с электропроводностью 315—320 мксим. см и цветностью 10—15°. Эти воды имеют и более высокую температуру по сравнению с волжскими водами. Таким образом, на примере р. Меры можно наблюдать подтекание высокоминерализованных вод притока под менее минерализованные воды водохранилища. Аналогичная картина наблюдается и в приустьевом заливе р. Елнати.

В северной части юрьевецкого расширения зимой прослеживаются воды Немды. Они более цветные по сравнению с волжскими (цветность их достигает 100) и менее минерализованы. Электропроводность колеблется в пределах 140—160 мксим./см. Находясь в подпертом состоянии со стороны волжских и унженских вод, они постепенно прогреваются на придонных горизонтах до 1.2—1.5. Залив по Унже целиком заполнен водами этой реки. Электропроводность их у Нежитина равна 250 мксим. см, а у дер. Горчухи достигает 320 мксим./см при цветности 20—30. В открытой части водохранилища воды Унжи прослеживались лишь на придонных горизонтах в районе Исаковских островов. Таким образом, за исключением приустьевых участков крупных притоков зимой вся акватория водохранилища заполнена волжской водной массой. Такая картина распределения водных масс в водоеме сохраняется до весны, меняются лишь абсолютные значения их отдельных характеристик. В Горьковском водохранилище, как и в Рыбинском, воды различного происхождения заполняют вполне определенные районы водоема, в которых продолжительное время сохраняют свои свойства. Однако в связи с большей проточностью Горьковского водохранилища процесс трансформации их протекает более интенсивно, чем в Рыбинском, и имеет свои особенности.

Куйбышевское водохранилище

По характеру использования водных ресурсов и своему назначению Куйбышевское водохранилище имеет много общего с Горьковским. Несмотря на различные размеры и отличие в конфигурации берегов, оба водохранилища по классификации А. Б. Авакяна и В. А. Шарапова (1968) относятся к одному типу. Значительная роль в притоке воды в Куйбышевское водохранилище, как и в Горьковское, принадлежит Волге. Приток волжских вод в отдельные годы составляет 40—55% общей проточности в водоем. Если учесть, что дополнительно к этому 40—55% притока дает Кама, то становится очевидным, что эти две реки играют решающую роль в формировании водных масс водохранилища. Боковая проточность в Куйбышевское водохранилище, как и в Горьковское, мала.

Все это дает основание считать Горьковское водохранилище в отношении формирования водных масс в известной степени аналогом для Куйбышевского и других, подобных ему водохранилищ. Следовательно, общие закономерности формирования водных масс, установленные для Горьковского водохранилища, можно распространить и на Куйбышевское. Благодаря этому можно, не проводя специальных исследований, составить представление о водных массах в Куйбышевском водохранилище на ограниченном материале наблюдений.

Одной из исходных водных масс Куйбышевского водохранилища являются воды Горьковского водохранилища. По исследованиям К. К. Эдельштейна (1965а), поздней весной приплотинную часть Горьковского водо-

хранилища южнее г. Пучежа, а иногда и севернее его заполняют трансформированные волжские воды, электропроводность которых колеблется около 100 мксим./см, а температура равна примерно 16°. Наши последующие наблюдения показали, что характеристики данных вод обычно близки, а в отдельные годы совпадают с указанными выше. Поступая в нижний бьеф, эти воды сохраняют свои характеристики до устья Оки.

Под влиянием Оки и других правобережных притоков, воды которых сильно минерализованы, показатели водной массы Горьковского водохранилища начинают сильно изменяться. Так, температура поверхностного слоя воды при впадении Оки по ходу воды повышалась в июне 1960 г. с 17 до 23°, а электропроводность увеличилась до 415 мксим./см (рис. 111).

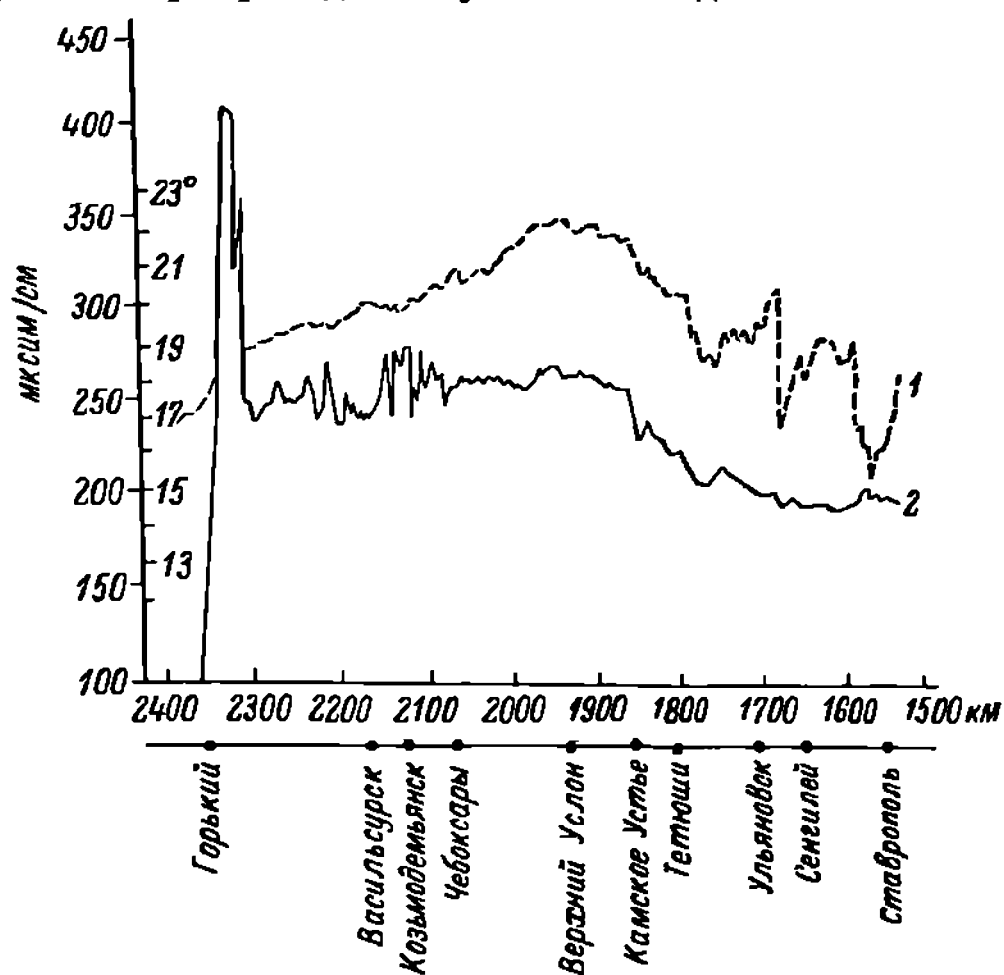


Рис. 111. Изменение температуры (1) и электропроводности (2) в поверхностном слое воды незарегулированной части Волги и в Куйбышевском водохранилище с 22 по 27 июня 1960 г. (по В. И. Рутковскому, 1963).

Такое резкое различие в характеристиках вод Оки и водных масс, поступающих из Горьковского водохранилища, сохранялось недолго. В процессе смешения их значения обоих показателей уменьшались, и в районе деревни Зименки температура поверхностного слоя воды равнялась 19°, а электропроводность составляла 250 мксим./см.

Для весеннего периода характерной особенностью распределения температуры и электропроводности на речном участке Волги ниже плотины Горьковской ГЭС является не только общее понижение этих показателей по ходу воды, но и резко выраженные колебания электропроводности. Электропроводность колеблется в широких пределах как по ходу воды, так и на поперечных разрезах. Ниже впадения Оки различия в значениях ее у правого берега и на середине реки достигали 250 мксим./см (Рутковский, 1963).

В верховьях Куйбышевского водохранилища, начиная от г. Чебоксары, температура поверхностного слоя воды постепенно повышается и в районе Казани по всему сечению реки иногда достигает 23°, в то время как электропроводность практически не меняется и колеблется в пределах 260—280 мксим./см. Изменения рассматриваемых характеристик наблюдаются

и в зоне постоянного подпора (см. рис. 111). Температура поверхностного стоя воы продолжает повышаться до камского устья, и лишь ниже впадения Камы до Тетюши происходит резкое уменьшение ее. Южнее г. Тетюши она с такой же интенсивностью вновь повышается по ходу воды. Начиная с разреза у г. Тетюши и до плотины Кузбывшевской ГЭС наблюдается четкая выраженная вертикальная стратификация температуры. На отдельных вертикалях различия температуры воды на поверхности и у дна достигают 7,5°. Неоднородность температуры прослеживается и на поперечных разрезах. Обычно наиболее теплая вода располагается у правого приглубого берега, а холодная — у левого мелководного, причем разность температур у правого и левого берега в ряде случаев достигает 4° (Рутковский, 1963).

В отличие от температуры электропроводность воды на этом участке водохранилища постепенно уменьшается (см. рис. 111). Общее падение ее от с. Верхний Услон до с. Поводевичье может достигать 80 мксим. см. Интересно отметить, что подобная картина изменения электропроводности весной наблюдается в Иваньковском, Угличском и Горьковском водохранилищах. До устья Камы распределение электропроводности в водной толще весьма однородно и существенных различий в значениях ее как по вертикали, так и на поперечных разрезах не наблюдается. Незначительная неоднородность вод по электропроводности прослеживается лишь на разрезе у камского устья и сохраняется до плотины Волжской ГЭС. В отличие от верховьев водохранилища и особенно от речной части Волги (от г. Горького до г. Чебоксары) различия в электропроводности на поперечных разрезах в зоне постоянного подпора невелики (порядка 5—14 мксим. см), и только в Черемшанском заливе эта разность превышает 20 мксим. см (Рутковский, 1963).

Следует отметить, что различия вод по электропроводности и температуре в заливах значительнее, чем в водохранилищах. Это хорошо видно на примере Черемшанского залива в Кузбывшевском водохранилище. Черемшанский залив образовался в пойме р. Большой Черемшан и представляет собой акваторию длиной 70 км и шириной 8—12 км. По объему он превышает некоторые водохранилища волжского каскада, например Иваньковское и Угличское в 2 раза, а по площади в 1,5 раза. Общая гидрологическая и биологическая характеристика Черемшанского залива дана Н. А. Дзюбаном и А. И. Елисеевым (1966), а некоторые данные о структуре водных масс приведены Ю. И. Горинным (1968).

Анализ температуры и электропроводности показал, что весной в заливе хорошо прослеживаются три водные массы: воды р. Большой Черемшан, Кузбывшевского водохранилища и Сусканского залива. Формирование их связано с тем, что во время наполнения водохранилища в залив вдоль его правого берега проникают воды водохранилища. Достигая средней части Черемшанского залива, эти воды встречают речную водную массу Большого Черемшана. Частично перемешиваясь с ней, они возвращаются вдоль левого берега залива обратно в водохранилище. В нижней части Черемшанского залива эта водная масса соприкасается с водами Сусканского залива, под влиянием которых электропроводность ее повышается до 320—340 мксим. см.

С уменьшением стока р. Большой Черемшан и прекращением поступления вод из Сусканского залива летом в Черемшанском заливе выделяются только две водные массы: речная и водохранилища. Различия по электропроводности и температуре между этими водами весьма значительны. Так, электропроводность речной водной массы как весной, так и летом в 2,5 раза выше электропроводности вод водохранилища.

Таким образом, распределение температуры и электропроводности указывает на то, что в конце весны Кузбывшевское водохранилище запол-

няют воды различного происхождения, которые в отдельных районах характеризуются вполне определенными значениями этих показателей. Анализ температуры и электропроводности на участке Волги от Горьковской до Волжской ГЭС им. В. И. Ленина позволяет выделить в первом приближении для поздней весны три отличные друг от друга водные массы (табл. 88).

Т а б л и ц а 88

Характеристики подных масс Куйбышевского водохранилища 26—27 июля 1960 г.

Водная масса	Занимаемый участок	Температура °С	Электропроводность мк см. м
Горьковского водохранилища	Горьковская ГЭС—устье Оки	15—17	100—110
Волжская	Устье Оки—устье Камы	12 23	240—415
Куйбышевского водохранилища	Устье Камы Волжская ГЭС им. В. И. Ленина	15.4 19	204—2 0

Первая из них — водная масса Горьковского водохранилища. Она занимает участок Волги от Горьковской ГЭС до устья Оки и отличается относительным постоянством характеристик. Электропроводность ее вдвое меньше, чем в бытовых условиях реки. Речной участок Волги и верховье Куйбышевского водохранилища от устья Оки до устья Камы заполнены волжской водной массой, температура и электропроводность которой близки к этим показателям в естественных условиях незарегулированной Волги. Волжская водная масса образуется в результате смешения водной массы Горьковского водохранилища с водами боковой приточности, и прежде всего Оки и других правобережных притоков. При значительной неоднородности химического состава этих вод, несмотря на высокие скорости течения, обеспечивающие однородное распределение характеристик внутри каждой из них, различия между отдельными водами сохраняются на всем незарегулированном участке реки. Известная обособленность право- и левобережной части потока приводят к резким колебаниям характеристик, особенно на участке от устья Оки до г. Чебоксары (см. рис. 111), и только в зоне переменного подпора после смешения этих вод волжская водная масса становится более однородной как по температуре, так и по электропроводности.

Ниже устья Камы водоем заполнен водной массой собственно водохранилища, формирующейся главным образом за счет смешения волжской водной массы с водами Камы. Поскольку больших различий в характеристиках этих вод нет, то смешение их происходит сравнительно быстро даже при малых скоростях течения. Уже в районе г. Тетюши водная масса Куйбышевского водохранилища становится однородной как по глубине, так и по поперечному сечению. Хотя в зоне постоянного подпора весной наблюдается температурное расслоение водной толщи, последняя представляет собой единую водную массу.

В зависимости от водности и климатических особенностей года абсолютные значения характеристик водных масс могут испытывать значительные колебания, однако разновидности вод и районы их распространения будут более или менее постоянны. Это хорошо подтверждается нашими исследованиями водных масс Куйбышевского водохранилища в летне-осенний период (Буторин и Курдина, 1968).

В это время влияние боковой приточности на режим водохранилища настолько мало, что практически не вносит каких-либо изменений в харак-

теристик и водных масс водохранилища и последние должны быть более постоянны, чем весной.

В летне-осенний период приплотинная часть Горьковского водохранилища, откуда поступает большая часть притока Куйбышевского водохранилища, заполнена весьма однородной водной массой с температурой 17–19 и электропроводностью порядка 150–170 мксим./см. Цветность ее колеблется в пределах 40–45. Следует отметить, что значения приведенных характеристик совпадают с такими же показателями водной массы центральной части Рыбинского водохранилища. Это указывает на то, что данные воды заполняют значительную часть Горьковского

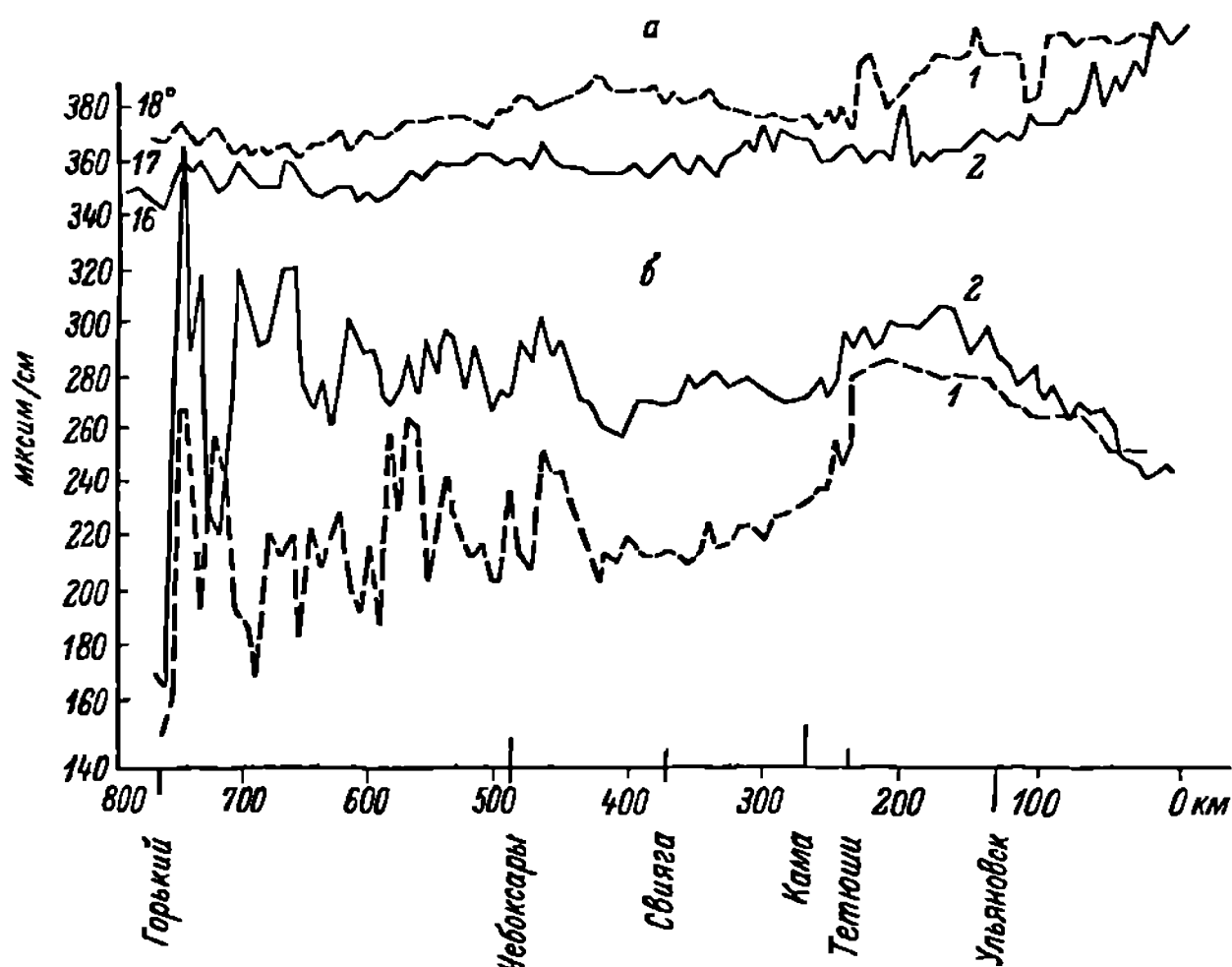


Рис. 112. Изменение температуры (1) и электропроводности (2) в поверхностном слое воды в незарегулированной части Волги и Куйбышевском водохранилище в августе 1962 г. (а) и сентябре 1964 г. (б).

водохранилища и по пути следования в пределах его практически не меняют своих основных показателей. Такое положение согласуется с данными К. К. Эдельштейна (1965б), по расчетам которого воды, сбрасываемые из Рыбинского водохранилища, в летние месяцы составляют свыше 80% приточности озерной части Горьковского водохранилища и показатели этих вод по пути следования меняются незначительно.

Поступая в нижний бьеф Горьковского водохранилища, эти воды сохраняют свои свойства до устья Оки. Ниже характеристики их резко меняются, что отражается прежде всего на электропроводности (рис. 112). В августе 1962 г. ее значения на середине Волги в 10 км ниже Оки повысились почти вдвое и достигли 270–290 мксим./см, а в сентябре 1965 г. увеличились от 170 до 370–420 мксим./см. Следовательно, как и весной, наиболее интенсивная трансформация водной массы Горьковского водохранилища происходит ниже устья Оки и прежде всего под влиянием ее сильноминерализованных вод.

Смешение окской и волжской вод происходит очень медленно. Зона разделения между высокоминерализованными правобережными водами и водной массой, поступающей из Горьковского водохранилища, распо-

лагается почти в вертикальной плоскости по течению воды. Резкое различие в электропроводности водных масс в зоне раздела и относительное постоянство в пределах каждой из них сохраняется на десятки километров. Лишь в районе городов Васильсурск и Чебоксары после смешения этих вод волжский поток становится более однородным и его электропроводность на 70—120 мксим./см превышает электропроводность водной массы Горьковского водохранилища.

В процессе смешения водной массы Горьковского водохранилища с водами Оки и других правобережных притоков характерные особенности их теряются и речной участок Волги ниже устья Оки заполняют воды, по своим свойствам отличающиеся от исходных. Это так называемая волжская водная масса. По температуре и цветности в летне-осенний период она сходна с водами, поступающими из Горьковского водохранилища, но электропроводность ее на 100—120 мксим./см выше, причем, как и весной, наблюдаются резкие колебания ее значений (см. рис. 112).

В зависимости от условий года волжская водная масса поступает в Куйбышевское водохранилище в летне-осенний период с температурой 18—19°, электропроводностью 220—280 мксим./см и цветностью около 55. В пределах водохранилища до устья Камы эти характеристики сохраняются. Речные меженные и сток промышленных вод существенного влияния на изменение характеристик волжской водной массы не оказывают.

В зоне постоянного подпора крупнейшим притоком Волги на участке Куйбышевского водохранилища является Кама. По данным А. Н. Горюнова (1936), летом в бытовых условиях электропроводность камской воды была выше волжской примерно на 70—80 мксим./см. Поскольку бытовой меженный расход Камы был невелик, ее воды не вызывали значительного повышения электропроводности в Волге. После зарегулирования Камы летний сток ее увеличился, но роль камских вод в изменении характеристик волжского потока осталась прежней. Так как больших различий в характеристиках волжской водной массы и вод Камы не наблюдается, то и в летне-осенний период смешение их происходит сравнительно быстро. Безусловно, при большой ширине водоема в устье Камы этому способствует ветер, роль которого в перемешивании вод особенно велика в указанные сезоны (Буторин, 1968).

Уже в районе г. Тетюши водная масса Куйбышевского водохранилища с температурой около 19° и электропроводностью 280—300 мксим./см однородна как по глубине, так и по поперечному сечению. Эти характеристики ее независимо от климатических особенностей года сохраняются до г. Ульяновска. От г. Ульяновска к плотине Волжской ГЭС им. В. И. Ленина в летних водах водохранилища, как и на приплотинных участках других водохранилищ подобного типа, температура поверхностного слоя воды повышается, а электропроводность постепенно понижается. В результате приплотинная часть водохранилища в летне-осенний период заполнена водной массой, температура которой равна 20—20,5°, а электропроводность 240—250 мксим./см. Цветность вод Куйбышевского водохранилища на этом участке составляла 45.

Формирование водной массы Куйбышевского водохранилища в летний период прослежено Ю. И. Гориним (1968). Анализируя распределение электропроводности в районе слияния вод Волги и Камы, данный автор сумел показать, каким образом в результате трансформации этих вод образуется водная масса водохранилища. Рассмотрим процесс формирования на примере двух различных по водности лет.

В начале июля многоводного 1966 года волжские воды с электропроводностью порядка 250 мксим./см и цветностью 36, распространяясь по руслевой части водохранилища вдоль правого берега, достигали г. Тетюши (рис. 113, а). Камские воды, электропроводность которых составляла

около 0,1 м и цветностью 44, занимали левобережную часть озера и проследовались значительно южнее этого пункта. В результате смешения волжских и камских вод образовалась водная масса водохранилища, которая обнаруживалась на всем пути соприкосновения их и по своим характеристикам заметно отличалась от исходных вод (табл. 89).

Таблица 9
Максимальные значения электропроводности вод (мксм. см) в зоне формирования водной массы Куйбышевского водохранилища
(по Ю. И. Горину, 1968)

Водная масса	1966			1967		
	6 VII	7 VIII	4 IX	9 VII	9 VIII	4 IX
Волжская	256	281	306	317	340	356
Камская	327	366	372	402	421	442
Куйбышевского водохранилища	292	323	331	354	382	393

От устья Камы до г. Тетюши она располагалась узкой полосой между волжскими и камскими водами. Только южнее г. Тетюши акватория, занимаемая водной массой водохранилища, значительно увеличивалась.

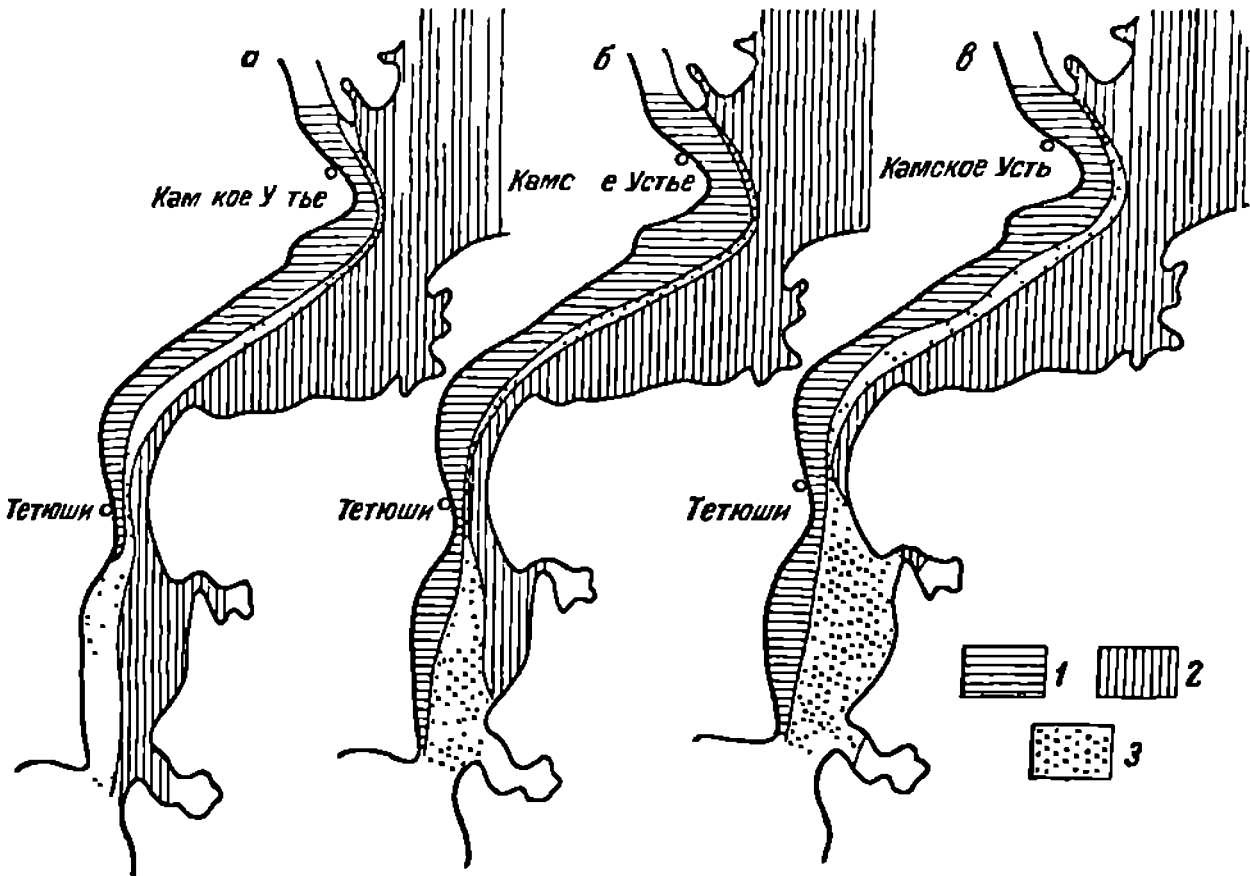


Рис. 113. Формирование водной массы Куйбышевского водохранилища в июле (а), августе (б) и сентябре (в) 1966 г. (по Ю. И. Горину, 1968).
1 — волжская водная масса; 2 — камская водная масса; 3 — водные массы Куйбышевского водохранилища.

В августе (рис. 113, б) и сентябре 1966 г. (рис. 113, в) с уменьшением стока Камы уменьшалась и площадь, занимаемая камской водной массой, а волжская вода распространялась южнее г. Тетюши. Как и в июле, основным районом формирования водной массы водохранилища являлось расширение его к югу от г. Тетюши.

Аналогичная картина в формировании водной массы Куйбышевского водохранилища наблюдалась и в маловодном 1967 г. (рис. 114). В отли-

ние от многоводного 1966 г. в этом году формирование водной массы водохранилища шло более интенсивно. Из табл. 89 видно что в зависимости от водности года существенно меняются значения электропроводности водных масс.

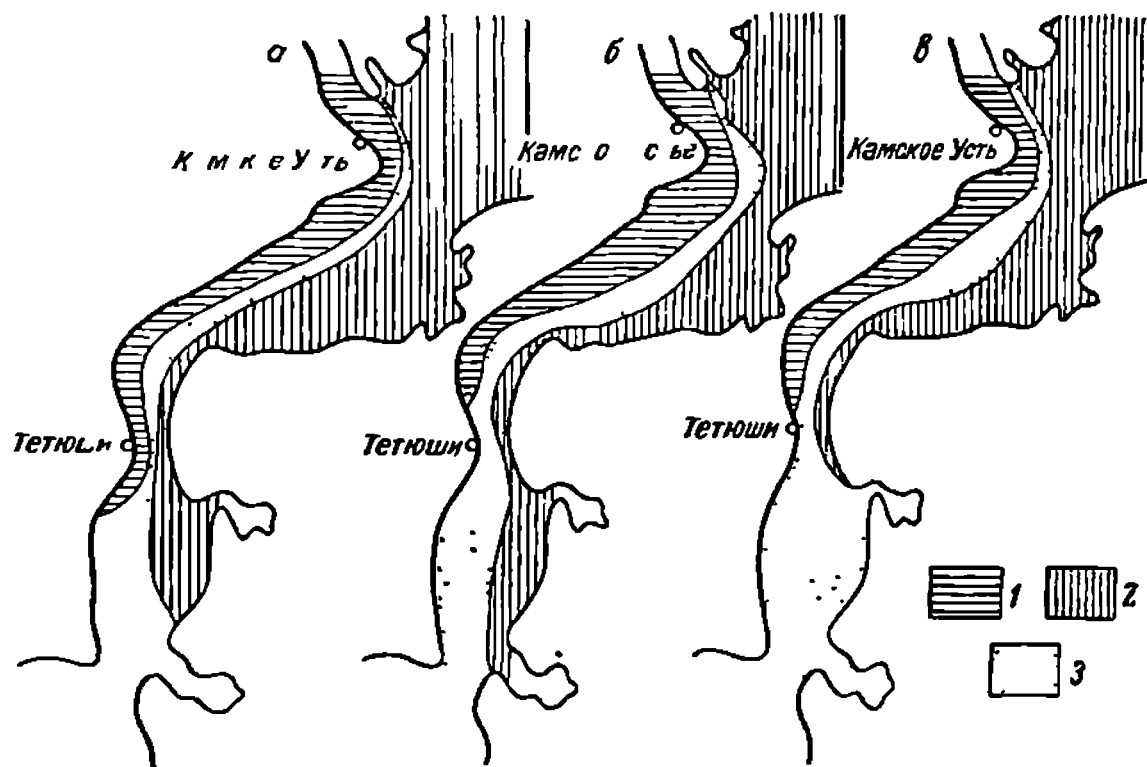


Рис. 114. Формирование водной массы Куйбышевского водохранилища в июне (а), июле (б) и сентябре (в) 1967 г. (по Ю. И. Горину 1968).

Условные обозначения те же, что и на рис. 113.

Таким образом, и в летне-осенний период анализ температуры, электропроводности и цветности на исследуемом участке Волги позволяет не только проследить за изменением этих характеристик по ходу воды, но и дает основание в первом приближении выделить различные водные массы и определить примерные границы их распространения (табл. 90).

Таблица 90

Характеристика водных масс Куйбышевского водохранилища в летне-осенний период

Водная масса	Участок	VIII 1962		IX 1965		
		электропроводность, мксим./см	температура, °С	электропроводность, мксим. см	температура, °С	цветность, град. Сг-Со
Горьковского водохранилища Волжская	Горьковское водохранилище—устье Оки	140—160	16.5—18.8	160—200	16.3—17.8	35—45
	Устье Оки—устье Камы	170—270	18.2—19.5	200—420	17.5—18.5	45—70
Куйбышевского водохранилища	Устье Камы—Волжская ГЭС им. В. И. Ленина	235—285	19.0—20.5	270—305	18.0—20.5	45—50

Результаты наших неоднократных наблюдений в последующие годы при различных условиях погоды позволяют считать выделенные водные массы реально существующими, а районы распространения их вполне установленными.

Волгоградское водохранилище

Основную роль в формировании водных масс Волгоградского водохранилища играют воды Куйбышевского водохранилища. Основная масса их в начале июля имеет температуру порядка 19—21° и электропроводность 240—260 мксим. см. В сентябре температура этих вод на 2—3° ниже по сравнению с июлем, а электропроводность несколько выше.

По ходу водной массы значения температуры и электропроводности постепенно повышаются и достигают максимальных значений в верхнем бьефе Волжской ГЭС им. XII съезда КПСС (рис. 115). Несмотря на различия в абсолютных значениях характеристик, тенденция к изменению их по длине водохранилища из года в год сохраняется. Общая картина изменения температуры в Волгоградском водохранилище полностью совпадает с таковой в других водохранилищах волжской системы, а в изменении электропроводности имеются некоторые отличия. В подавляющем большинстве водохранилищ Волги электропроводность по ходу водной массы в зоне подпора постепенно уменьшается и в непосредственной бли-

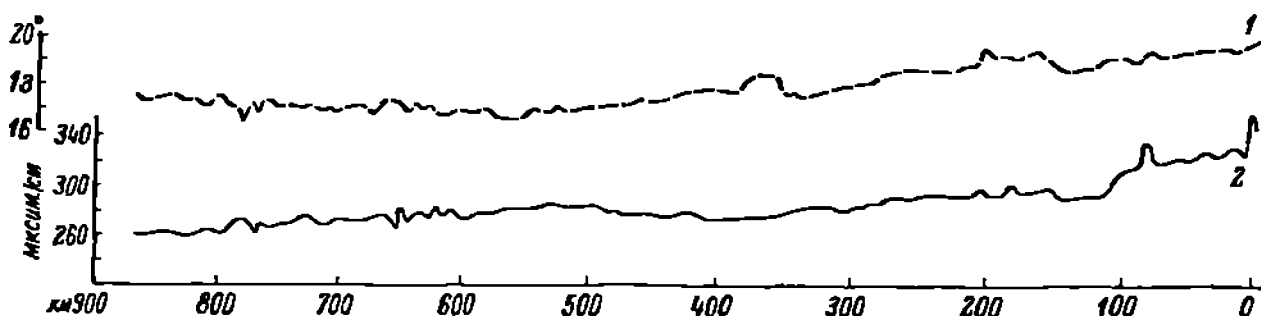


Рис. 115. Изменение температуры (1) и электропроводности (2) по длине Волгоградского водохранилища 16—20 сентября 1965 г.

зости от плотины значения ее становятся минимальными. В Волгоградском водохранилище наблюдается обратная картина: с приближением к плотине электропроводность хотя и незначительно, но систематически увеличивается. Это связано с особенностью эксплуатации водных ресурсов водоема. При работе ГЭС на транзитной воде не происходит заметного разбавления вод, поступающих из Куйбышевского водохранилища, а за время их перемещения в пределах водоема даже незначительная боковая приточность несколько повышает их общую минерализацию. При высокой проточности водохранилища воды притоков не задерживаются в приустьевых участках, а вовлекаются в общий поток и быстро перемешиваются с основной водной массой, поступающей из Куйбышевского водохранилища.

Несмотря на некоторые изменения температуры и электропроводности по длине водохранилища, на основе этих характеристик затруднительно выделить в нем обособленные водные массы. По крайней мере, в летне-осенний период весь водоем заполнен весьма однородной водной массой.

Таким образом, можно считать установленным, что воды, сформировавшиеся в одинаковых физико-географических условиях, имеют устойчивый комплекс физических и химических характеристик. Поступая в водохранилища, они заполняют в них вполне определенные районы, в которых продолжительное время сохраняют свои свойства и представляют собой обособленные водные массы. Анализ распределения важнейших характеристик водных масс по акватории водохранилищ и по их профилям позволил достаточно надежно выделить водные массы в волжских водохранилищах, дать их характеристику и показать распространение по сезонам года.

Глава V

АНАЛИЗ ВОДНЫХ МАСС В ВОДОХРАНИЛИЩАХ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА

Анализ водных масс в водоеме предполагает не только выделение отдельных разновидностей вод и определение их характеристик, но также и выявление распределения этих вод и количественного соотношения в водоеме. Представляет значительный интерес определение процентного содержания водных масс, встречающихся в том или ином водохранилище или в определенном районе водоема.

До последнего времени существовало мнение, что устойчивость водных масс в водохранилищах, особенно в навигационный период, при мелководности этих водоемов очень мала и вертикальная неоднородность их практически отсутствует. Так, в первые годы существования Рыбинского водохранилища П. П. Воронков (1951а) не обнаружил каких-либо существенных различий и минерализации поверхностной и придонной воды ни на одном участке водоема. Однако материалы синхронных съемок, проведенных нами в последующие годы, позволили внести некоторые уточнения в представление о вертикальной структуре вод этого водоема. Оказалось, что в нем в отдельные сезоны отчетливо прослеживается неоднородность водных масс по глубине.

И, наконец, поскольку пространственное распределение водных масс в водохранилищах не остается постоянным даже в течение одного сезона, а тем более от сезона к сезону, должно изменяться и объемное соотношение их. Иными словами, в водохранилищах наблюдается четко выраженная сезонная динамика водных масс.

Распределение водных масс в водохранилищах различного типа

В зависимости от морфометрических особенностей и характера эксплуатации водохранилищ картина распределения водных масс в каждом из них имеет свои отличия и меняется от сезона к сезону. Так, в Ивановском водохранилище, особенно весной, четко прослеживается положение речной водной массы и водохранилищной. Более теплая речная водная масса конца половодья занимает зону выклинивания, волжский плес водохранилища и в поверхностном слое прослеживается на приплотинном участке водоема. Водная масса собственно водохранилища располагается на придонных горизонтах верхнего бьефа Ивановской ГЭС (рис. 116).

Общее представление о распределении основных водных масс в Рыбинском водохранилище по сезонам года дает рис. 117, из которого видно, что водные массы в течение года занимают вполне определенные районы водохранилища. Весной всю южную часть водоема занимает волжская

она (рис. 117, а) По ходу основного потока волжских вод в сторону Р. Свинской она глубоко проникается в воды центральной части водохранилища. Граница ее с водной массой центральной части водохранилища проходит на северо-запад и ранее ближайшего сел. Горькая Соль, а иногда и западнее его. Отсюда к северу восточнее в направлении к бывшему сел. Всеволода у сел. Рокновского она резко поворачивает сначала на юго-восток и затем почти строго на юг, прижимаясь к восточному берегу Каменинского полуострова.

Моложская водная масса весной располагается в западной части водохранилища, придерживаясь старого русла и поймы Мологи, и отчетливо прослеживается до района пос. Бронного и юго-восточнее его. Она заполняет также значительную часть мелководья к северу западу от русла Мологи. Граница ее с водной массой центральной части водохранилища проходит на северо-востоке по Моложскому затопленному долины Мологи, а на

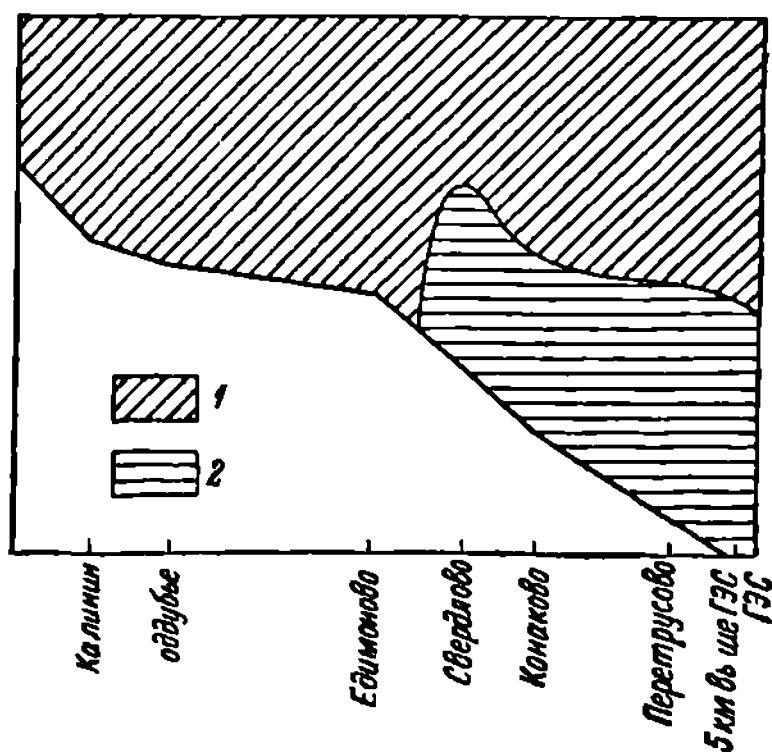


Рис. 116 Распределение водных масс в Иваньковском водохранилище в июне 1967 г.

1 — поверхностная речная водная масса 2 — придонная водная масса водохранилища

юге около бывшего сел. Леонтьевского. Положение границы раздела этих водных масс весной из года в год весьма устойчиво.

Шекснинская водная масса занимает северную часть водохранилища. Граница ее с водами центральной части водохранилища проходит обычно в районе дер. Леувино, но в отдельные годы располагается и южнее его.

Большую часть водоема занимает водная масса центральной части, представляющая собой в основном трансформированные волжские и шекснинские воды.

В приустьевых участках крупных притоков водохранилища весной иногда прослеживаются местные воды.

Летнее распределение водных масс заметно отличается от весеннего (рис. 117, б). Волжская водная масса в связи с уменьшением расхода Угличской ГЭС занимает в этом сезоне значительно меньший район, чем весной. Граница ее с водами центральной части водохранилища проходит по линии бывшего сел. Горькая Соль — мыс Рожновский. В летний период в чистом виде волжская вода не поступает в сбросной участок водохранилища.

Моложская водная масса летом прослеживается лишь в районе выхода моложских вод в расширенную часть водохранилища. Граница ее с водной массой центральной части водоема проходит на северо-востоке не по мелководьям лобовой поймы Мологи, а по руслу у бывшего сел. Борисоглеба.

В отличие от этих водных масс шекснинская вода из-за более позднего половодья занимает югом больший район, чем весной. Граница ее с водной массой центральной части водохранилища сдвинута на юг и проходит примерно в районе бывшего дер. Ягорбы.

Несмотря на интенсивное ветровое перемешивание водных масс в осенний период, полного смешения их не происходит (рис. 117, в). Волжская водная масса осенью занимает район водохранилища к югу от затопленного г. Мологи. Граница ее с водной массой центральной части водохра-

я. Лица проходит на севере в районе г. Мологи и не достигая Рожновского мыса, резко поворачивает на юг. Осенью происходит дальнейшее уменьшение площади, занимаемой волжскими водами.

Соответственно по сравнению с предшествующим сезоном и площадь молодой водной массы. Граница ее с водами центральной части водо-

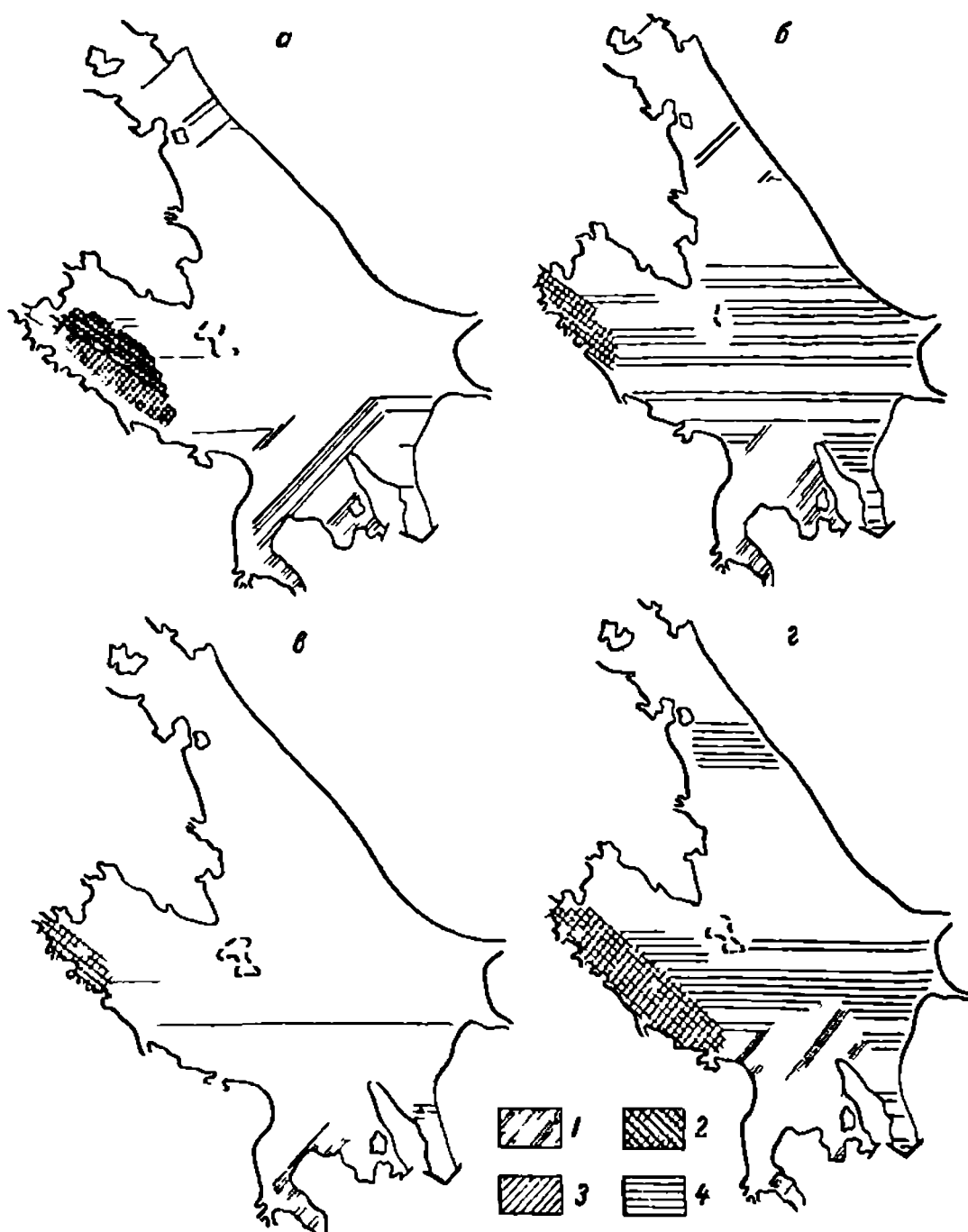


Рис. 117. Распределение водных масс в Рыбинском водохранилище весной (а), летом (б), осенью (в) и зимой (г).

1 — волжская водная масса; 2 — моложская водная масса; 3 — шекснинская водная масса; 4 — водная масса водохранилища.

хранилища смещается на запад и прослеживается практически лишь в районе Первомайских островов.

Шекснинская водная масса осенью отмечается только на севере соответствующего участка водохранилища. Граница ее с водами центральной части водоема проходит в районе сел. Мякса. Таким образом, участки водохранилища, занимаемые волжской, моложской и шекснинской водными массами, осенью резко уменьшаются и всю центральную часть водоема с примыкающими к ней районами по долинам крупных рек заполняет водная масса центральной части водохранилища. Она отжимает волжские воды от западного берега Каменниковского полуострова и занимает значительный район водоема, примыкающий к Переборскому заливу, и сам залив.

Картина распределения водных масс в водохранилище резко меняется зимой (рис. 117, з). Волжская водная масса заполняет весь южный участок водохранилища к западу от Каменниковского полуострова, включая и Переборский залив, и глубоко вклинивается в воды центральной части водохранилища.

Моложская водная масса зимой располагается вдоль русла и юго-западного берега водохранилища до бывшего сел. Леонтьевского, где соприкасается с волжской водой. В этом сезоне она занимает также значительную часть мелководья к северо-востоку от русла Мологи, в направлении Центрального мыса.

Обширный район водохранилища по Шексне зимой захватывает шекснинская водная масса. Граница ее с водами собственно водохранилища проходит в районе дер. Леушино, а в отдельные годы — несколько севернее. Как и весной, в приустьевых участках крупных притоков прослеживаются воды последних. Особенно хорошо это видно на примере вод Ухры и Согожи (см рис. 117, з).

Несмотря на то что представленная картина распределения водных масс водохранилища по сезонам из года в год в основном повторяется, расположение их в отдельные сезоны в зависимости от климатических особенностей года может несколько меняться. На рис. 118 показано положение границ водных масс водохранилища весной 1960 и 1962 гг. Маловодной весной 1960 г. границы водных масс фактически совпадали с общим положением их для данного сезона (см. рис. 117, а). Единственная особенность заключается в том, что волжская водная масса весной 1960 г. вклинивается в воды центральной части водоема и отделяет часть их в районе Переборского залива. В многоводном 1962 г. картина несколько иная. Если положение моложской водной массы близко к среднему, то граница волжской воды заметно сдвинута к северу, а граница шекснинских вод из-за большего объема половодья на Шексне сместилась далеко на юг и шекснинская водная масса заняла весь участок водохранилища к северу от линии Центральный Мыс—сел. Гаютино.

Таким образом, распределение водных масс в Рыбинском водохранилище по сезонам в общих чертах 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, занятые этими водами, постепенно уменьшаются, и осенью они прослеживаются лишь в местах выхода в озеровидную часть водохранилища. Зимой волжская, моложская и шекснинская водные массы постепенно вытесняют воды центральной части водохранилища и к концу зимы снова занимают по затопленным долинам рек обширные пространства водоема.

Некоторые особенности распределения водных масс Рыбинского водохранилища в отдельные сезоны сохраняются и в Горьковском водохранилище. Так, весной значительные пространства этого водоема в приустьевых участках крупных притоков заполнены водными массами соответствующих рек. Ранней весной приплотинная часть водохранилища южнее сел. Сокольского занята однородными зимними водами волжского происхождения. Эта водная масса, значительно трансформированная в результате смешения с водами половодья малых притоков речной части водохранилища, прослеживается и в надрусловом участке водоема, севернее сел. Сокольского. пойменный участок юрьеvecкого расширения весной заполнен водами половодья Унжи и Немды.

Слабомиерализованные воды половодья Немды занимают северную часть юрьеvecкого расширения (рис. 119, а). Протягиваясь отсюда узкой полосой к югу, вдоль затопленной бровки русла Волги, они разделяют волжские и унженские воды. Воды половодья Унжи заполняют север-

восточную часть юрьеvecкого расширения и распространяются к югу вдоль восточного берега водохранилища. Граница их с водами Немды проходит на севере обычно вдоль группы Исаковских островов.

При небольшом полезном объеме водохранилища и значительной проточности в весенний период расположение водных масс в нем быстро меняется. Волжская водная масса, значительно трансформированная водами половодья притоков, распространяясь к югу по старому руслу Волги, вытесняет зимние воды приплотинного участка и заполняет обширные пространства озерной части водоема. Одновременно с этим увеличивается и площадь водохранилища, занимаемая водами половодья Унжи и Немды, которые по левобережной части водоема прослеживаются южнее сел. Сокольского.

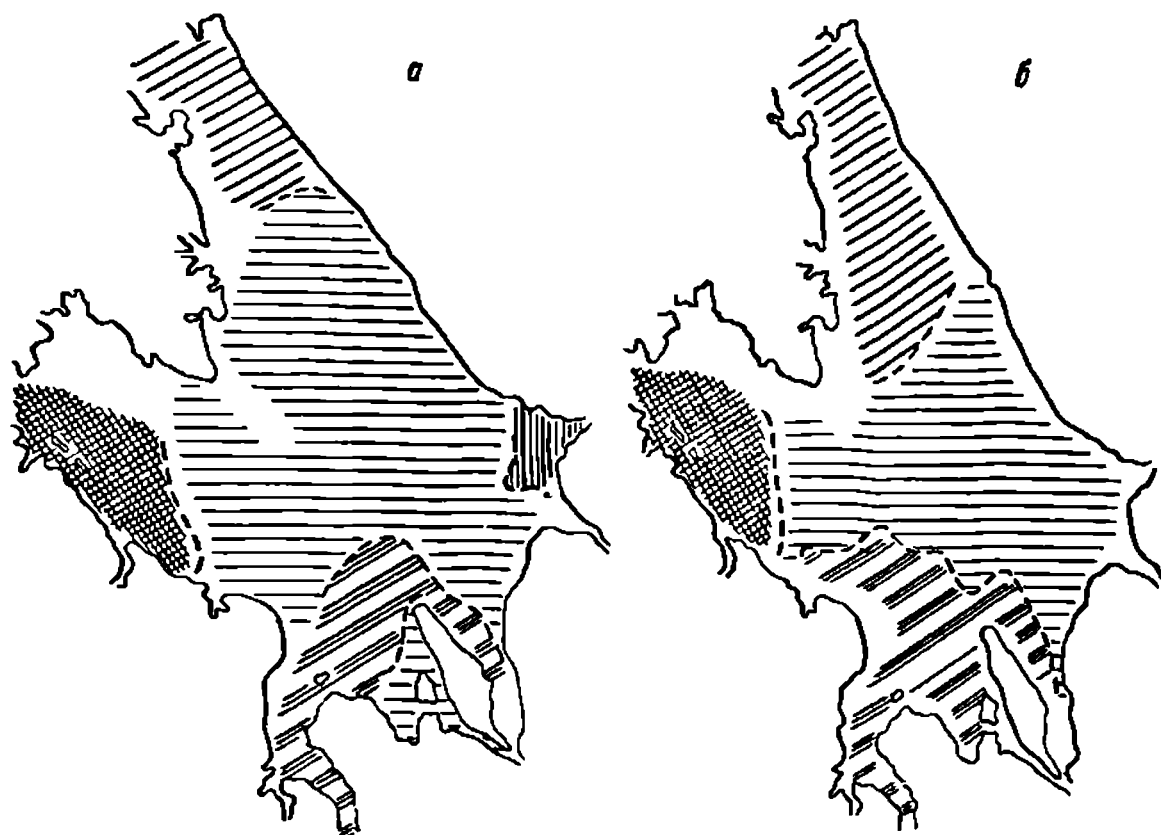


Рис. 118. Распределение водных масс в Рыбинском водохранилище 9 мая 1960 г. (а) и 12 мая 1962 г. (б).

Условные обозначения те же, что и на рис. 117.

Особенности распределения водных масс в водохранилище в середине весны видны на рис. 119, а. В этот период водная масса, поступающая из Рыбинского водохранилища, имеет наибольшую в году минерализацию и занимает участок водоема от Рыбинской ГЭС до Ярославля. Ниже Ярославля она сильно трансформируется водами притоков, особенно Которосли и Костромы. В озерной части водохранилища граница ее с водами Немды и Унжи проходит вдоль левой бровки старого русла Волги и цепи островов, расположенных между деревнями Воспица и Столпино, и дальше на юг к сел. Сокольскому. К югу от сел. Сокольского трансформация волжских вод в это время настолько значительна, что можно говорить о формировании новой водной массы — весенней водной массы собственно водохранилища (Эдельштейн, 1965а). Эта водная масса занимает озерную часть водоема от района сел. Сокольского до плотины Горьковской ГЭС.

В конце весны—начале лета волжская водная масса в озерной части водоема занимает северо-западную часть юрьеvecкого расширения и даже низовья залива по р. Немде (рис. 119, б). Граница между волжскими водами и подпертыми ими водами Немды проходит обычно севернее сел. Завражья. На востоке и юго-востоке юрьеvecкого расширения волжская водная масса

соприкасается с водами половодья Унжи. Ядро этих вод располагается у юго-восточного побережья водохранилища. Граница между волжскими и унжскими водами проходит от группы Исаковских островов к юго-западу на г. Юрьевец, а затем поворачивает на юг вдоль бровки волжского русла и апацион цепочки Юрьевецких островов. В зависимости от соотношения объемов рассматриваемых водных масс расположение их в юрьевском расширении может меняться. Иногда воды Немды и Унжи зна-

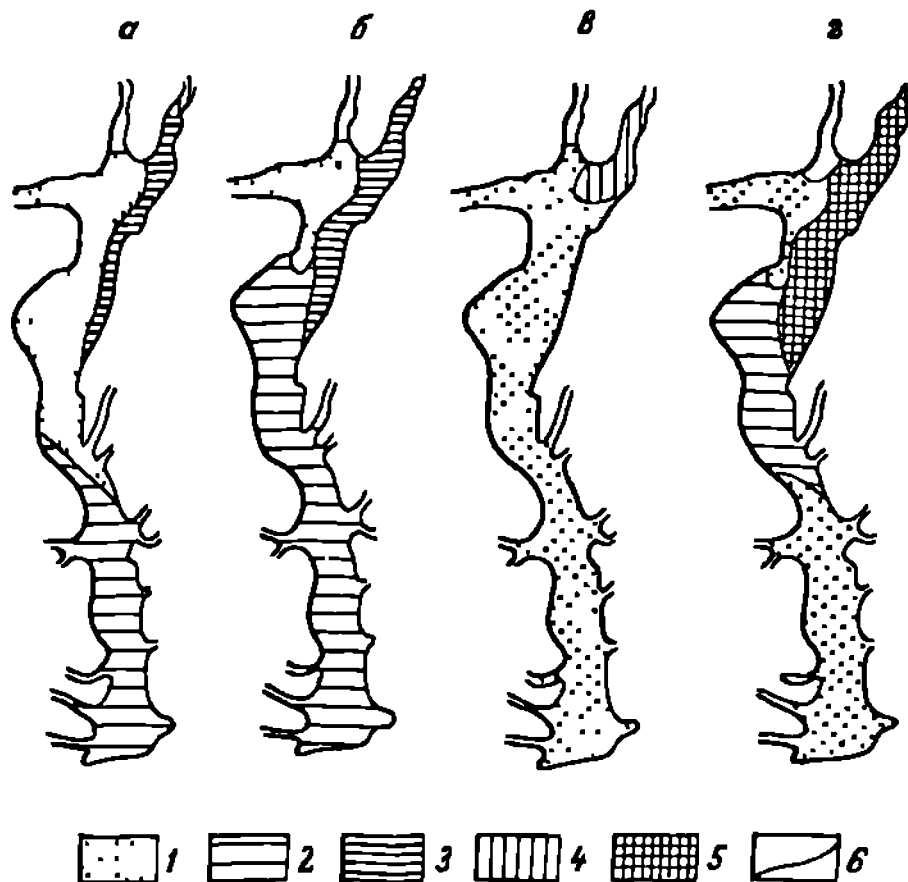


Рис. 119. Распределение водных масс в озерной части Горьковского водохранилища (по К. К. Эдельштейну, 1965).

а — 18—20 июня 1962 г.; б — 29 июня, 5 июля 1961 г.; в — 10, 26 июля 1962 г.; г — 1, 7 сентября 1962 г.: 1 — волжская водная масса, 2 — водная масса водохранилища, 3 — воды половодья Унжи, 4 — воды межень Унжи, 5 — воды паводка Унжи, 6 — граница водных масс.

чительно продвигаются к югу и занимают всю центральную часть юрьевецкого расширения.

Вся южная половина озерной части водохранилища в конце весны заполнена весьма однородной водной массой, отличной по своим характеристикам от вод, сформированных водами весеннего половодья.

Летом характер распределения водных масс в Горьковском водохранилище заметно отличается от весеннего периода (рис. 119, в). Воды летней межени Немды и Унжи не всегда выходят в юрьевецкое расширение. Так, в последней декаде июля 1961 г. воды Немды не прослеживались даже в ее приустьевом участке, а граница вод Унжи с водной массой озерной части водохранилища проходила несколько южнее сел. Кобылино (Эдельштейн, 1965а). Вся речная часть водохранилища и большая половина озерного участка летом заполнена весьма однородной волжской водной массой, поступающей из Рыбинского водохранилища.

При больших дождевых паводках воды Немды и Унжи летом могут выходить и в юрьевецкое расширение. Так, летом 1962 г. они отчетливо прослеживались в его северной и северо-восточной части. Граница слабо-минерализованных и высокоцветных вод Немды с волжской водной массой проходила в районе деревень Сорочково—Лубяны, а выше Исаковских островов волжская вода соприкасалась с водами Унжи.

С увеличением речного стока в конце лета за счет дождевых паводков характер распределения водных масс в озерной части водохранилища несколько меняется (рис. 119, 2). Волжская водная масса, поступая в юрьевецкое расширение и заполняя западную часть его в районе г. Юрьевца, несколько трансформируется в результате смешения с водами Немды и Унжи. Под влиянием этих рек характеристики волжской водной массы на участке водохранилища между городами Юрьевцом и Пучежом несколько меняются. Но, по существу, как и летом, весь прирусловый участок Волги в озеровидной части водохранилища в это время заполнен волжской водной массой. Это подтверждается материалами ряда скоростных съемок водохранилища, выполненных нами в 1962 и 1965 гг.

Из рис. 119, 2 видно, что в северной части юрьевецкого расширения низовья залива по р. Немде заполнены водами этой реки, частично трансформированными в результате смешения с волжской водной массой, а значительную часть расширения занимают воды Унжи. Они заполняют не только залив по Унже, но и восточную часть этого расширения с пойменным участком водохранилища между Юрьевецкими островами и левым берегом, распространяясь по левобережной пойме до сел. Сокольского.

Следует отметить, что указанные границы между отдельными водными массами являются в известной мере условными, так как устойчивость водных масс в озерной части водохранилища, особенно в летне-осенний период, невелика и очень часто нарушается воздействием ветра. Так, после шторма 25—27 июля 1962 г. вся акватория озерной части водоема оказалась заполненной однородной водной массой, причем такое положение сохранялось длительное время.

С увеличением расходов Рыбинской ГЭС в зимний период почти все водохранилище заполняется волжской водной массой. Воды Немды и Унжи прослеживаются лишь в приустьевых заливах этих рек. Граница между волжской водной массой и водами Немды зимой проходит от сел. Завражья к южной оконечности Исаковских островов и далее на северо-восток к водоразделу этой реки с Унжей. Воды Унжи, как и воды Немды, заполняют унженский залив и не выходят в юрьевецкое расширение.

В зимний период воды Немды и Унжи, более минерализованные по сравнению с волжскими водами, подтекают под воды водохранилища, и поэтому в районе выхода их в водоем четко прослеживается вертикальная неоднородность водной толщи.

Таким образом, распределение водных масс в Горьковском водохранилище по сезонам года имеет общие черты с распределением их в Рыбинском. Эпизодические обследования других водохранилищ волжского каскада показали, что и в них характер сезонного распределения водных масс подобен таковому в Горьковском водохранилище. Это хорошо видно на примере Куйбышевского водохранилища.

Общая картина распределения водных масс в большинстве рассмотренных водохранилищ сводится к следующему. Весной значительные акватории водохранилищ, прилегающие к речным участкам притоков, заполнены водными массами соответствующих рек. В летне-осенний период площади, занятые речными водами, постепенно уменьшаются, и осенью эти воды прослеживаются лишь в местах их выхода в озеровидную часть водохранилищ или в приустьевых заливах. Зимой во время наиболее интенсивной сработки водохранилищ речные водные массы постепенно вытесняют воды водохранилищ и в конце зимы снова занимают по затопленным долинам рек обширные пространства водоемов. В связи с этим

границы между водными массами непостоянны и положение их зависит от соотношения объемов исходных водных масс и отметки уровня воды в водохранилищах.

Вертикальная структура водных масс

Для характеристики вертикальной неоднородности водных масс в волжских водохранилищах весьма показательной является электропроводность. Это хорошо прослеживается на примере Рыбинского водохранилища. Наиболее четко различия в электропроводности воды по вертикали проявляются зимой, особенно в центральной части водоема и в соседних с ней слабопроточных районах, где максимальные величины электропроводности превышают минимальные на 30% и более, а в отдельных случаях их различия увеличиваются до 100%.

После вскрытия водохранилища с усилением стоковых течений по затопленным руслам рек и на приплотинном участке различия в электропроводности воды по вертикали заметно уменьшаются. В результате интенсивного перемешивания вод течениями в речных потоках Волги, Мологи и Шексы электропроводность с глубиной практически не меняется. Но за пределами непосредственного воздействия речных потоков на воды центральной части водоема различия в электропроводности воды по вертикали сохраняются. На большинстве станций центральной части водохранилища, включая район к северо-востоку от затопленного русла Мологи, в середине мая максимальные величины электропроводности превышают минимальные на 10—20%, а на отдельных вертикалях их различия достигают 40% и более.

В первой половине июня, когда наполнение водохранилища заканчивается, стоковые течения ослабевают и происходит интенсивный прогрев вод водоема, различие в электропроводности по вертикали снова увеличивается. Обычно в первой половине июня максимальные величины электропроводности превышают минимальные на 10—30%, но на отдельных вертикалях они бывают и больше. Заметная неоднородность вод водохранилища по глубине в это время отчетливо наблюдалась в 1960, 1961 и 1964 гг. Следовательно, ее нельзя рассматривать как случайность, но при мелководности водоема и неустойчивом режиме его она может быстро нарушаться под воздействием ветра. Так, сильные ветры, дующие в днн, предшествующие съемке, и отчасти во время съемки 14 июня 1963 г. привели к полному перемешиванию вод водохранилища по вертикали.

Летом различие в электропроводности вод по вертикали заметно уменьшается. Однако и в этом сезоне на некоторых станциях центральной части водохранилища электропроводность воды в придонном слое несколько выше, чем в поверхностном. Только с усилением ветрового перемешивания вод водохранилища в осенний период распределение ее по глубине становится однородным по всей акватории водоема.

Неоднородность водных масс по вертикали в Рыбинском водохранилище легко прослеживается и на кривых типа T, S . Рассмотрим возможность использования T, S -кривых в анализе вертикальной структуры вод Рыбинского водохранилища на примере станций, выполненных 8 апреля 1967 г. на моложском участке водоема. T, θ -кривая одной из станций изображена на рис. 120, а. На ней выделяются экстремум и две ветви кривой — поверхностная и придонная. Такая форма T, θ -кривой дает основание предполагать наличие трех водных масс: поверхностной, промежуточной и придонной.

Водная масса, характеризующаяся концом поверхностной ветви кривой, представляет поверхностную водную массу, лежащую в слое от 0 до 4 м.

Поверхностная водная масса отличается большой изменчивостью своих характеристик. Наиболее вероятно, что она представляет собой трансформированные воды центральной части водохранилища, электропроводность которых уменьшилась в результате поступления талых вод малых притоков и таяния льда, а температура повысилась вследствие прогрева их через лед и за счет тепла, приносимого водами притоков.

Водная масса с максимальными значениями электропроводности и минимальными значениями температуры (электропроводность — 320 мксим./см, температура — около 0.4), занимающая промежуточное положение, представляет собой моложские воды (см. табл. 74). Водная масса с высокой электропроводностью и максимальными значениями темпе-

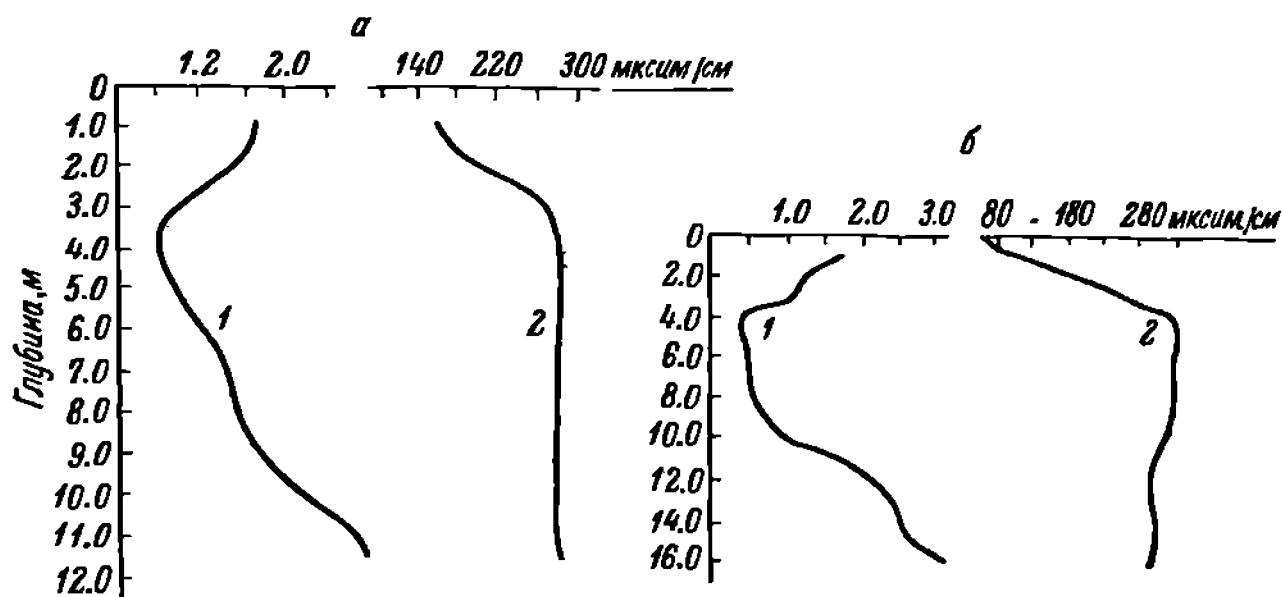


Рис. 120. Кривые вертикального распределения температуры (1) и электропроводности (2) на станциях 42 (а) и 43 (б) в Рыбинском водохранилище 8—9 апреля 1967 г.

ратуры, расположенная в придонном слое, представляет собой трансформированную моложскую воду, повышенная температура которой связана с прогревом от дна в условиях замедленного водообмена.

Таким образом, в результате анализа T , θ -кривых определяются не только водные массы с их характеристиками, но и границы между водными массами (табл. 91). Интересно отметить, что T , θ -кривые соседней ст. 42 очень похожа на кривую ст. 43 (рис. 120, б). Следовательно, рассмотренная нами станция является характерной для определенного района водоема.

По ограниченному числу станций трудно характеризовать вертикальную структуру вод водоема в целом. Вполне вероятно, что T , θ -кривые не всегда и не во всех районах водохранилища являются такими простыми и по ним не всегда можно определять характеристики водных масс и их границы, но данный пример наглядно показывает возможность использования этого метода для анализа водных масс волжских водохранилищ и подтверждает наличие в отдельные сезоны вертикальной неоднородности вод Рыбинского водохранилища.

Установив наличие вертикальной неоднородности вод в Рыбинском водохранилище, попытаемся определить процентное содержание отдельных водных масс в том или ином районе водоема. Для этой цели нами использован широко применяемый в океанологии метод выделения процентного состава вод по треугольнику смешения (Тимофеев и Панов, 1962; Мамаев, 1963). Строилась диаграмма, аналогичная T , S -диаграмме, но по оси абсцисс ее откладывались в определенном масштабе цветность или температура, а по оси ординат — электропроводность. В этих координатах наносились точки максимальных значений соответствующих

Таблица 91

Первичная структура водных масс на ст. 43 в Рыбинском водохранилище 8 апреля 1967 г.

Водная масса	Температура, °С	Длина пробы, м/см	Глубина, м
Поверхностная	19	80	0-40
Переходная	0-1	320	10-45
Полная	3-1	300	15-20

показатели для каждой водной массы. Эти отмоченные точки соединялись прямыми линиями и в результате получался треугольник.

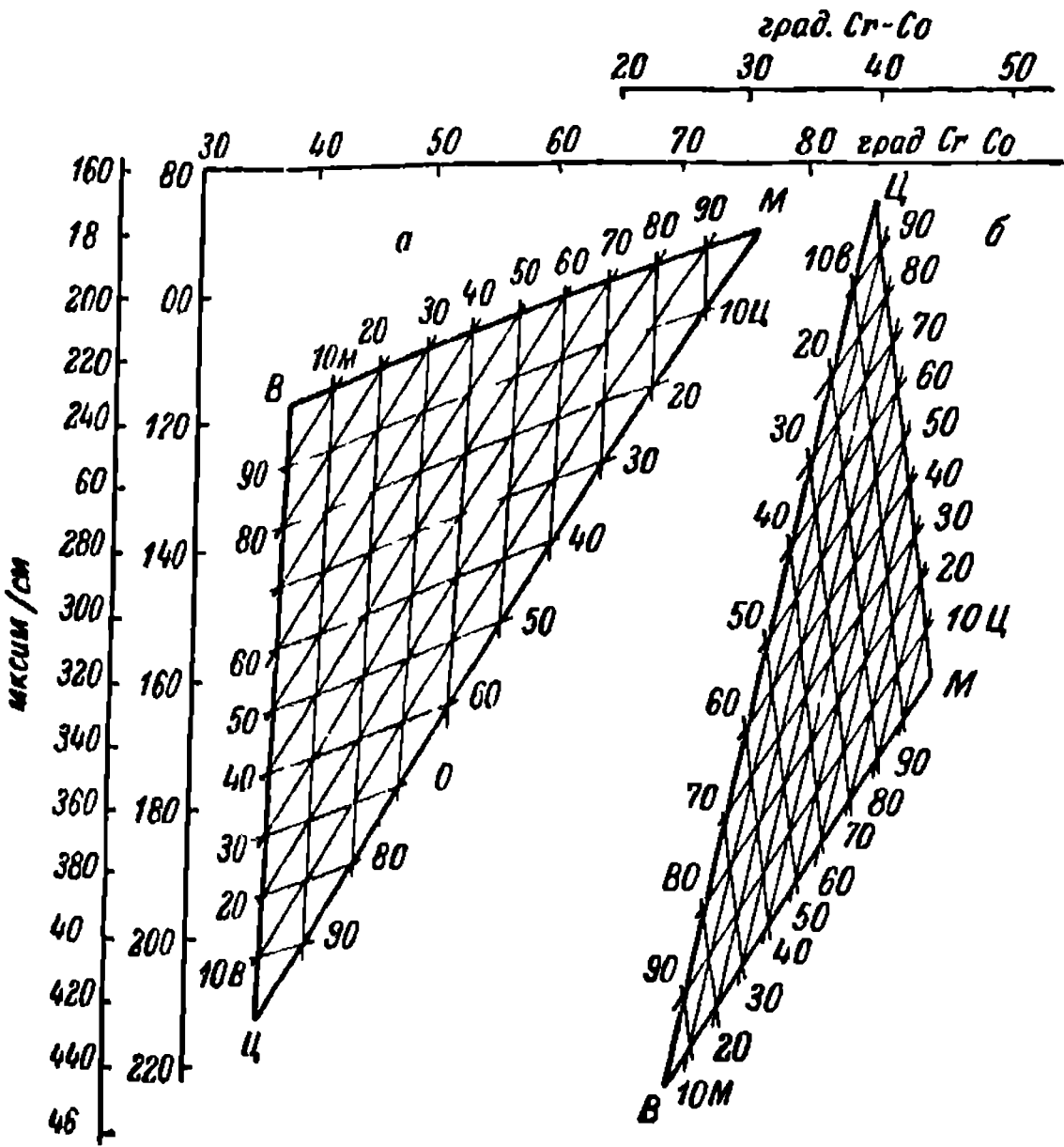


Рис. 121. Помогранмы для вычисления процентного содержания водных масс в мае 1961 г. (а) и апреле 1962 г. (б).

В — волжская водная масса, М — молодская водная масса, Ц — водная масса в водохранилище

Для примера рассмотрим два таких треугольника смещения в поле координат электропроводность — цветность (рис. 121). Один из треугольников (а) отражает условия смещения волжской (В), молодской (М) и водной массы центральной части водохранилища (Ц) 12 мая 1961 г., а другой (б) — смещение этих же водных масс в конце марта — начале апреля 1962 г. Вершины треугольников представляют собой соответствующие водные массы в чистом виде. Условно принимая закон изменения

концентрации различных водных масс для таких треугольников в прямоугольном, получаем, что по стороне ВМ концентрация волжской и моложской водных масс в любой точке будет обратно пропорциональна расстоянию данной точки от вершин В и М, по стороне ВЦ концентрация волжской и водной массы центральной части водохранилища в любой точке будет обратно пропорциональна расстоянию ее от вершин В и Ц и по стороне ЦМ концентрация водной массы центральной части водоема и моложских вод в каждой точке будет обратно пропорциональна расстоянию точки от вершин Ц и М.

Подобным образом можно определить процентный состав водных масс и в других районах водохранилища, а также концентрацию прибрежных вод на отдельных участках водоема. М. Г. Ершовой (1965) при изучении распределения водных масс в водохранилище было отмечено, что в весенний период воды с ледового стока и малых притоков с Молого-Шекснинского полуострова образуют на правобережной пойме Шексны восточнее Центрального мыса местную прибрежную водную массу с ядром в районе сел. Копорья. Построение соответствующего треугольника смещения показало, что действительно в этом районе весной прибрежные воды играют весьма существенную роль и на отдельных станциях составляют большую концентрацию.

Имея такие треугольники смещения, построенные для конкретных районов водохранилища, можно вычислить процентное содержание водных масс на любой станции данного района с помощью номограмм (Тимофеев и Панов, 1962). Построение таких номограмм сводится к следующему. В треугольнике ВМЦ (см. рис. 121) точка В соответствует 100-процентному содержанию волжской воды. От точки В по направлению к противоположной стороне треугольника МЦ процентное содержание волжской воды уменьшается пропорционально расстоянию и на самой стороне МЦ равно нулю. Разбивая на равные отрезки стороны треугольника ВМ и ВЦ линиями, параллельными стороне МЦ, получаем на них шкалу процентного содержания волжской воды. Аналогичным образом можно получить и шкалу процентного содержания моложской воды и водной массы центральной части водохранилища. В результате такого построения получается номограмма, по которой с помощью соответствующих характеристик можно определять процентное содержание водных масс в исследуемой точке.

На рис. 121 представлены две такие номограммы, по которым определено для ряда станций процентное содержание волжской и моложской вод и водной массы центральной части водохранилища 12 мая 1961 и в апреле 1962 г. Нанесем на первую из этих номограмм (рис. 121, а) по данным электропроводности и цветности точки, соответствующие положению станций 6б, 8а, 9, 12, 13, 43, 43а, и 47, а на вторую — точки, соответствующие станциям 9, 10, 22 и 47 (рис. 121, б). Для нахождения процентного содержания водных масс на каждой из этих станций достаточно проинтерполировать расстояние между линиями, проведенными параллельно всем сторонам треугольника, в пределах которого легла точка соответствующей станции. Результаты таких расчетов для некоторых станций ряда синхронных съемок Рыбинского водохранилища представлены в табл. 92.

Таким образом, метод расчета процентного содержания водных масс по номограммам гидрологических характеристик, используемый в океанологии, с известными ограничениями применим и для континентальных водоемов. С помощью данного метода можно на каждый конкретный случай приблизительно рассчитать процентное соотношение различных водных масс в водохранилище и представить вертикальную структуру вод по ходу основных потоков.

Т а б л и ц а 92

Процентный состав вод Рыблнского водохранилища на некоторых станциях
синхронных съемок

И мер станций	Водная масса				
	волжская	моложская	шекснинская	центральной части	местная

12 V 1961

7	90	0	0	10	0
8, поверхность	39	8	0	53	0
8, дно	40	0	0	60	0
12, поверхность	72	0	0	28	0
12, дно	38	0	0	62	0
25, поверхность	0	0	63	34	3
25, середина	0	0	55	45	0
25, дно	0	0	45	55	0
30, поверхность	0	0	14	73	13
30, середина	0	0	0	90	10
30, дно	0	0	0	92	8
32	0	0	14	44	42
43, поверхность	0	33	0	67	0
43, дно	0	14	0	86	0
47	0	31	0	69	0

28 III—6 IV 1962

7, поверхность	93	4	0	3	0
7, середина	73	13	0	14	0
7, дно	67	10	0	23	0
8	75	16	0	9	0
9, поверхность	95	0	0	5	0
9, дно	78	22	0	0	0
10	0	0	0	100	0
41б, поверхность	0	8	0	0	92
41б, дно	0	40	0	25	35
42, поверхность	0	94	0	2	4
42, середина	0	100	0	0	0
42, дно	0	0	0	0	100
43, поверхность	0	13	0	77	10
43, середина	0	10	0	36	54
43, дно	0	26	0	10	64
47, поверхность	93	0	0	7	0
47, дно	79	21	0	0	0

11—15 IV 1964

7, поверхность	68	0	0	32	0
7, середина	75	18	0	7	0
7, дно	73	20	0	7	0
10, поверхность	3	10	0	87	0
10, середина	23	20	0	57	0
10, дно	42	30	0	28	0
47, поверхность	69	19	0	12	0
47, середина	62	0	0	38	0
47, дно	47	40	0	13	0

Зимой в юго-западной части водохранилища происходит смешение волжской и моложской вод с водами центральной части водохранилища. Станции 7 и 10 на рис. 122, а и б расположены по ходу волжского потока,

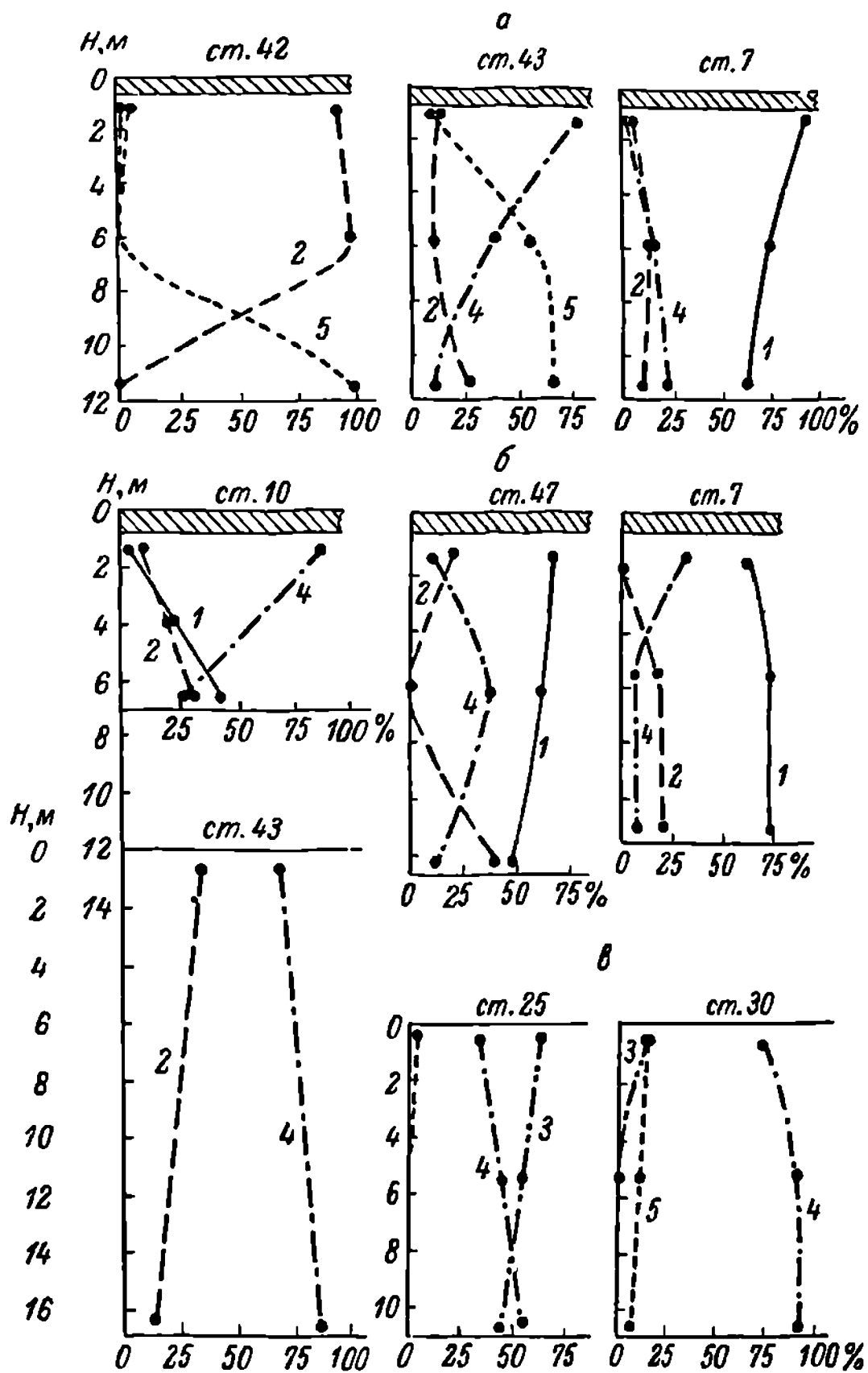


Рис. 122. Вертикальное распределение вод на различных участках Рыбинского водохранилища зимой 1962 (а) и 1964 (б) и весной 1961 гг. (в).

1 — волжская водная масса; 2 — моложская водная масса; 3 — шекснинская водная масса; 4 — водная масса центральной части водохранилища; 5 — местная вода.

а станции 42, 43 и 47 — по ходу моложского потока. Из этого рисунка видно, что процентное содержание волжской водной массы в районе затопленного г. Мологи весьма высокое. Как в 1963, так и в 1964 г. по всей вертикали оно превышало 60%. В отдельные годы процентное содержание волжской воды в этом районе в поверхностном слое составляло более 90%. На моложскую воду и воды центральной части водохранилища обычно

приходится около 40%, при этом доля участия их в формировании водной массы данного района примерно одинакова, хотя в зависимости от климатических особенностей года процентное соотношение их может меняться.

С выходом волжского потока в открытую часть водохранилища процентное содержание волжской воды быстро уменьшается и у затопленного сел. Паволок (ст. 10) оно колеблется от 4% на поверхности до 40% у дна. В этом районе преобладает водная масса центральной части водохранилища, содержание которой, особенно в поверхностном слое, значительно превышает содержание волжской воды.

Сложную картину представляет вертикальное распределение водных масс по ходу моложского потока. Так, у пос. Брейтово (ст. 42) наиболее вероятным было бы преобладание моложской воды, поскольку станция расположена при выходе моложского потока в расширенную часть водохранилища. В действительности же моложская вода здесь преобладает лишь в верхних слоях, где она составляет 94–100%. Но с середины глубины содержание ее резко уменьшается и у дна она практически отсутствует. Весь придонный слой заполнен другой водной массой, которая формируется за счет значительного стока высокоминерализованных вод р. Сити и частичного перемешивания их с моложской водой.

Весьма высоко содержание этой водной массы и в придонном слое у бывшего сел. Леонтьевского (ст. 43), где она составляет 60%. В указанном районе присутствуют и воды центральной части водохранилища. Процентное содержание их у бывшего сел. Леонтьевского колеблется от 77% в поверхностном слое до 10% у дна.

В конце марта—начале апреля 1962 г. на ст. 43 в поверхностном слое преобладала водная масса центральной части водохранилища, частично трансформированная моложскими водами и водами половодья малых притоков. С глубиной содержание ее быстро уменьшалось, а содержание моложской воды увеличивалось. Такая тенденция в соотношении этих водных масс сохранялась до дна. В результате трансформации их на придонных горизонтах образовалась новая водная масса, которую в данном случае мы условно назвали местными водами. Такое распределение водных масс на ст. 43 в конце марта—начале апреля 1962 г. полностью согласуется с данными, полученными 8 апреля 1967 г. (см. рис. 120) и указывает на реальность представленной картины и на объективность используемых методов анализа.

По ходу моложского потока содержание моложской воды продолжает уменьшаться и в районе бывшего сел. Горькая Соль (ст. 47) она вместе с водами центральной части водохранилища составляет лишь 30% в поверхностном слое и около 50% у дна. Основную массу в этом районе зимой составляет волжская вода. В поверхностном слое на ее долю приходится до 70%, а у дна — около 50%. Это хорошо согласуется с нашими представлениями о характере зимних течений в данном районе водохранилища, когда при определенном режиме работы Угличской ГЭС часть волжского потока движется вверх по старому руслу Мологи в район бывшего сел. Горькая Соль (Буторин и Литвинов, 1963б).

Интересно отметить, что, несмотря на уменьшение содержания моложской воды по ходу к центру водохранилища, в отдельные годы наблюдается присутствие ее и в открытой части водоема. Так, иногда в районе затопленного сел. Паволок на ее долю приходится до 20% водной массы.

Степень смешения волжской воды с водами центральной части водохранилища по пути следования ее к Рыбинской ГЭС весной можно просле-

дять по результатам наблюдений на ст. 8 и 12. На ст. 8, расположенной севернее Рожновского мыса, весной 1961 г. преобладали воды центральной части водохранилища. Процентное содержание их от поверхности ко дну заметно увеличивалось. Значительную долю здесь составляла и волжская вода, процентное содержание которой по всей глубине колебалось около 40%. В поверхностном 2-метровом слое прослеживалось небольшое количество моложской воды. С приближением к Рыбинской ГЭС (ст. 12) процентное содержание волжской воды в поверхностном слое сильно увеличивалось за счет уменьшения доли водной массы центральной части. Преобладание ее наблюдалось до глубины 15 м, и лишь в придонном слое возрастало содержание вод центральной части (см. табл. 92).

На моложском участке водохранилища в районе бывшего сел. Леонтьевского (ст. 43) выявлено наличие двух водных масс — моложской и центральной части. По всей вертикали этой станции процентное содержание вод центральной части значительно выше, чем моложской. Содержание их с глубиной увеличивалось, а моложской воды — уменьшалось.

В шекснинской части водоема наряду с шекснинской водой и водной массой центральной части водохранилища отмечалось незначительное содержание местных вод, формирующихся за счет склонового стока (ст. 25 и 30). В северной части участка преобладала шекснинская вода, содержание которой с глубиной несколько уменьшалось, а в южной (ст. 30) — вода центральной части водохранилища, процентное содержание которой колебалось от 72% на поверхности до 92% у дна.

Таким образом, по мере приближения к центральной части водохранилища волжская, моложская и шекснинская воды теряют свои характерные особенности из-за перемешивания с другими водами. Степень смешения этих вод с другими водными массами по ходу их увеличивается,

Т а б л и ц а 93
Результативное распределение электропроводности, гидрокарбонатов, жесткости и содержания кальция на разрезе Борок-Коприно 10 апреля 1963 г.

Номер вертика- лей	Электропроводность, мксм./см		Гидрокарбонаты, мг-экв. л		Жесткость, мг-экв. л		Кальций, мг-экв./л	
	поверхность	дно	поверхность	дно	поверхность	дно	поверхность	дно
1	275	275	2.38	2.38	2.74	2.97	1.76	1.82
2	269	271	2.36	2.15	2.74	2.54	1.88	1.84
3	274	282	2.27	2.38	2.81	2.97	1.84	1.90
4	78	293	0.51	2.62	0.93	3.03	0.60	1.84
5	75	243	0.48	1.69	0.87	2.39	0.48	0.56
6	73	256	0.47	2.16	1.05	2.52	0.48	1.16
7	65	67	0.47	0.42	0.87	0.85	0.50	—
8	67	76	0.18	0.46	0.85	0.81	0.48	0.45
9	63	61	0.85	0.36	0.62	0.64	0.41	—

но все же они в отдельных слоях отчетливо прослеживаются до центра водохранилища, а волжская вода — до Рыбинской ГЭС.

Вертикальная неоднородность водных масс в водохранилище четко проявляется также на других разрезах. Это хорошо видно по распределе-

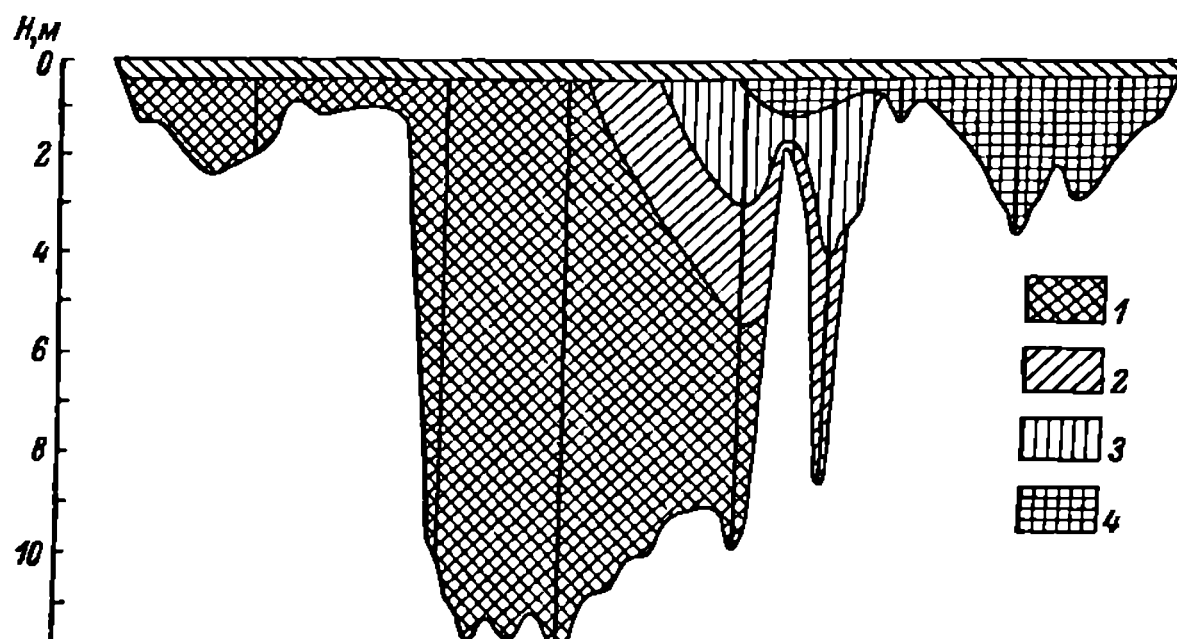


Рис. 123. Распределение водных масс на разрезе Борок—Коприно зимой 1962 г.

1 — волжская водная масса; 2 — смесь волжских вод с местными (волжской воды > 50%); 3 — смесь местных вод с волжскими (местных вод > 50%); 4 — местная вода.

нию некоторых характеристик на разрезе Борок—Коприно, представленных в табл. 93. Как следует из данной таблицы, одновременно с изменением электропроводности по разрезу на отдельных его вертикалях

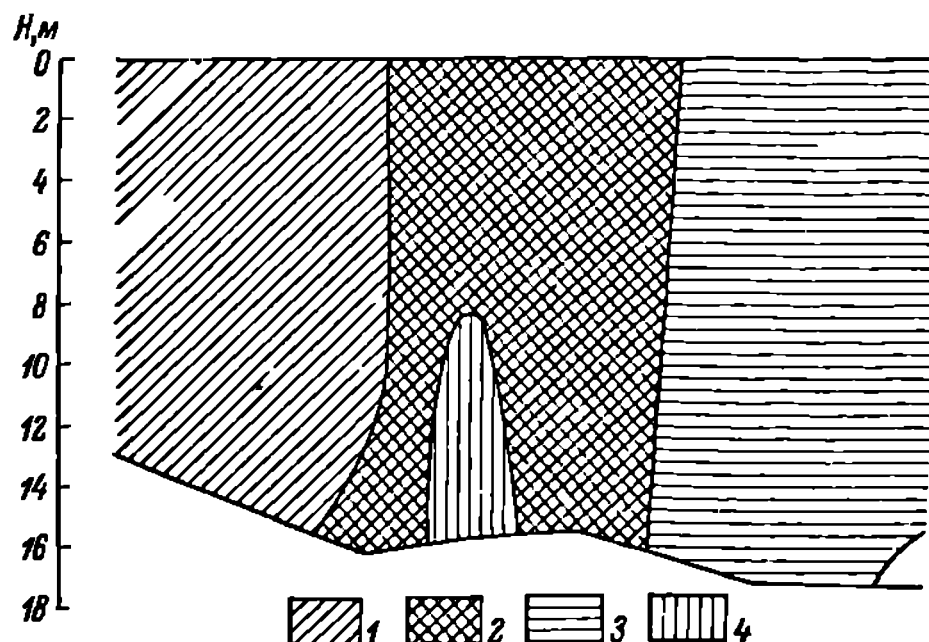


Рис. 124. Распределение водных масс по ходу воложского потока.

1 — воложская водная масса; 2 — смесь воложской воды с водой центральной части (воложской воды > 50%); 3 — смесь вод центральной части с воложской водой (вод центральной части > 50%); 4 — местная вода.

наблюдались значительные изменения ее с глубиной. Так, на вертикали левого склона русла разность между величиной электропроводности в поверхностном слое и у дна достигала 215 мксим./см. Большое различие электропроводности воды поверхностного и придонного слоев наблюдалось и на следующих двух вертикалях левобережной поймы:

на водоразделе между Волгой и Суткой и в русле Сутки. На первой из них разность между электропроводностью воды поверхностного и придонного слоев равнялась 138 мксим./см, а на второй — 183 мксим./см. В направлении к левому берегу электропроводность продолжала уменьшаться, но с глубиной она изменялась незначительно.

Основной поток волжской воды в старом русле Волги имеет более высокую электропроводность, чем на пойменных участках (рис. 123). Наиболее минерализованная вода, двигаясь по руслу Волги, заполняет также и правобережную пойму. На левую пойму она распространяется незначительно. Переваливая в придонном слое через водораздел между Волгой и Суткой, волжская вода заполняет русло Сутки и не выходит за его пределы. От левой бровки старого русла Сутки вся левобережная пойма занята мягкими водами неволжского происхождения.

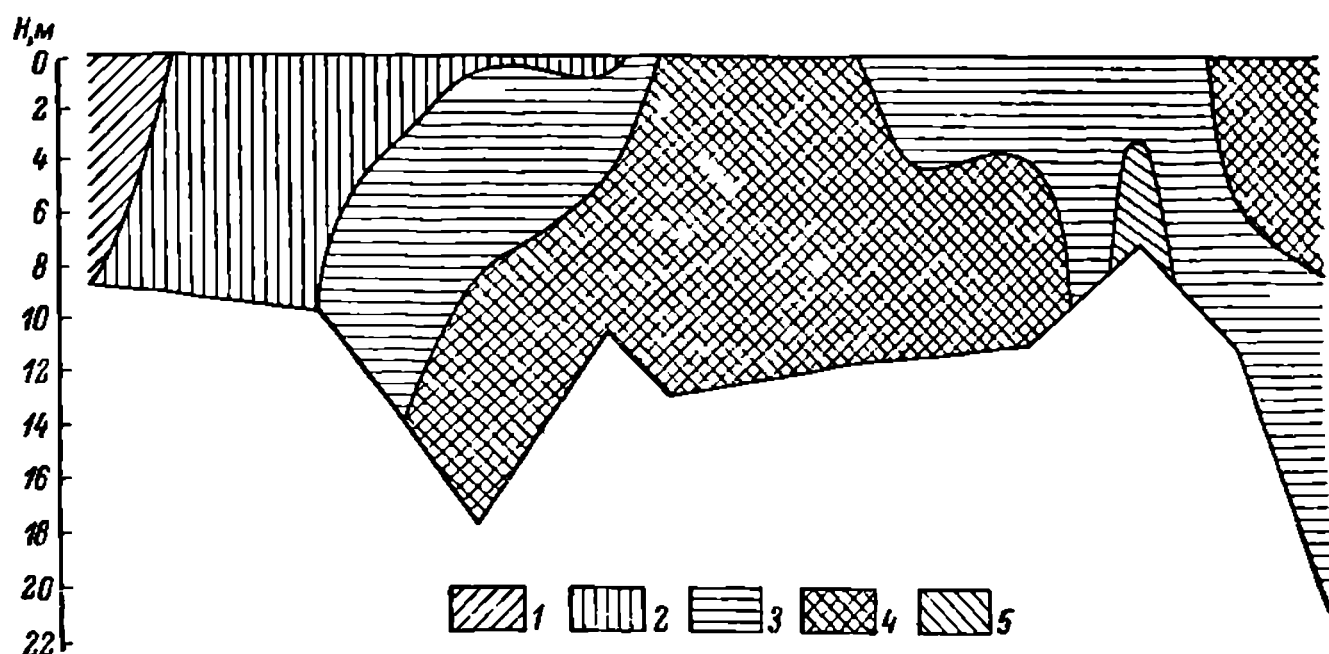


Рис. 125. Распределение водных масс по ходу шекснинского потока.

1 шекснинская водная масса; 2 смесь шекснинской воды с водами центральной части (шекснинской воды > 50%); 3 смесь вод центральной части с шекснинской или волжской и местной водой (вод центральной части > 50%); 4 — воды центральной части; 5 — смесь волжской воды с водами центральной части (волжской воды > 50%).

Вертикальное распределение водных масс при отсутствии ледяного покрова по оси моложского потока представлено на рис. 124, а по оси шекснинского — на рис. 125. Вычисление процентного содержания водных масс для отдельных вертикалей разрезов при неустойчивом режиме водохранилища в этот период весьма затруднительно, поэтому для характеристики вертикального распределения вод нами использовались поля температуры и электропроводности.

Положение изолиний температуры и электропроводности указывает на то, что весной моложский участок водохранилища от местечка Мшичина до бывшего сел. Горькая Соль заполнен в основном двумя водными массами — моложской и центральной части водохранилища. Северная часть участка до Первомайских островов (ст. 38) заполнена водой, однородной по вертикали, с относительно высокой температурой и низкой электропроводностью. Такие характеристики свойственны весной моложской воде. Между ст. 38 и 39 градиенты температуры и электропроводности резко возрастают, причем температура воды с глубиной быстро понижается, а электропроводность увеличивается. Повышение электропроводности и понижение температуры, особенно в придонном слое, отчасти обусловлено влиянием вод Сити, но наиболее вероятно, что такое изменение характеристик произошло из-за смешения моложской воды с водами центральной части, которые весной имеют низкую температуру и высокую электропроводность. Содержание этих вод по ходу моложского

потока быстро увеличивается, и на ст. 43 они значительно превышают содержание моложской водной массы. У бывшего сел. Горькая Соль весной она присутствует в очень незначительных количествах.

О вертикальном распределении водных масс в шекснинской части водохранилища можно судить по левой части разреза на рис. 125. По ходу шекснинского потока в сторону Рыбинской ГЭС содержание шекснинской воды постепенно уменьшается и уже южнее ст. 25, особенно на придонных горизонтах, оказывается заметное влияние вод центральной части водохранилища. В поверхностном слое шекснинская вода весной достигает района сел. Гаютино.

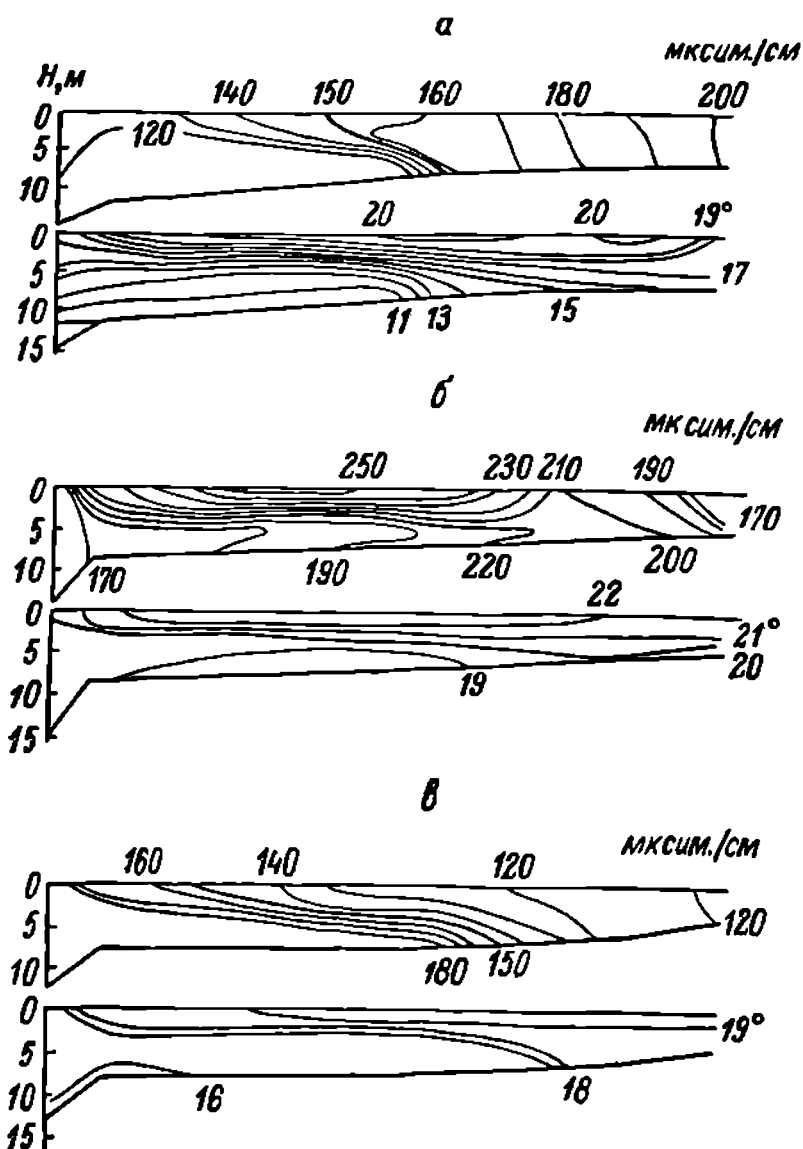


Рис. 126. Распределение водных масс по ходу вод р. Меры в Горьковском водохранилище (по К. К. Эдельштейну, 1968).

а — весной 1963 г., б — летом 1963 г.; в — во время паводка летом 1963 г.

Более минерализованная и холодная водная масса центральной части водохранилища занимает значительную площадь рассматриваемого разреза. В придонной его части она располагается от ст. 25 до ст. 14 и имеет верхней границей слой температурного скачка. На поверхности в наиболее чистом виде эта водная масса встречается на участке разреза от ст. 30 до ст. 33. С приближением к Рыбинской ГЭС в районе станций 14 и 13а сказывается влияние волжской воды. С выходом разреза в сбросной участок водохранилища содержание водной массы центральной части водохранилища вновь увеличивается. Здесь она составляет основную массу воды, сбрасываемой в нижний бьеф Рыбинской ГЭС. Таким образом, по расположению изолиний температуры и электропроводности на этом разрезе четко выделяются три водные массы (шекснинская, центральной части водохранилища и волжская), но большая часть его заполнена водой центральной части.

По расположению изолиний температуры и электропроводности на этом разрезе можно не только проследить за вертикальным распределением водных масс, но и отметить некоторые особенности их перемещения в водоеме. Так, шекснинская вода весной по мере движения в водохранилище постепенно натекает на воды центральной части. Водная масса центральной части, перемещаясь в сторону Рыбинской ГЭС, на поверхности несколько изменяет свои первоначальные свойства под влиянием интенсивного прогрева и таяния льда. По мере своего движения она в районе сел. Всехсвятского перемешивается с волжской водой. В отличие от шекснинского волжский поток вклинивается в воды центральной части по всей глубине и, частично перемешиваясь с ними, увлекается к Рыбинской ГЭС, придерживаясь восточного берега Каменниковского полуострова.

Таким образом, в Рыбинском водохранилище, особенно в центральной части, наблюдается неоднородность водных масс по вертикали, которая свидетельствует о том, что даже в таком мелководном водоеме водные массы обладают определенной устойчивостью.

Подобная неоднородность водных масс по глубине наблюдается и в других водохранилищах волжского каскада. Это особенно наглядно проявляется в приустьевых заливах притоков. Так, в период наполнения Горьковского водохранилища в заливе, образовавшемся в устье р. Меры, придонные слои представляли собой волжскую водную массу, а поверхностные — речные воды Меры. По данным К. К. Эдельштейна (1968), 18 мая 1963 г. волжская водная масса имела электропроводность 112—126 мксим./см и температуру 10—15°, а воды Меры — соответственно 160—200 мксим./см и около 21° (рис. 126, а). Неоднородность вод по глубине в рассматриваемом заливе сохраняется обычно до начала осеннего выхолаживания вод, а в летний период имеет характер, зафиксированный на рис. 126, б, в.

Аналогичная картина неоднородности водных масс по глубине наблюдается в Черемшанском заливе Куйбышевского водохранилища. Весной и летом в средней части залива придонные слои заполнены водами р. Большой Черемшан, а поверхностные — водной массой Куйбышевского водохранилища (Горин, 1968).

Неоднородность водной толщи по глубине в водохранилищах типа Горьковского и Куйбышевского четко проявляется не только в приустьевых заливах, но и по продольной оси этих водоемов, что особенно хорошо видно на примере Иваньковского водохранилища.

Сезонная динамика водных масс

Пространственное расположение водных масс в Рыбинском водохранилище не остается постоянным как в течение одного сезона, так и от сезона к сезону. Следовательно, должно изменяться и их объемное соотношение. Чтобы установить это, необходимо знать объемы водных масс хотя бы на даты синхронных съемок. Для вычисления объема той или иной водной массы требуется определение площади, занимаемой этой водной массой. Зная географическое распределение водных масс в водоеме во время каждой синхронной съемки, мы и попытались сделать это.

Площади речных водных масс определялись планиметрированием контура внутри ближайшей к отметке уровня изобаты с последующим добавлением поправки на положение уровня в день съемки, которая находилась по карте. Площадь водной массы центральной части водохранилища вычислялась как разность общей площади водоема, определенной по кривой площадей для соответствующего уровня, и суммой площадей речных вод. Поскольку работа оказалась весьма трудоемкой, мы ограничились вычислением площадей основных водных масс для трех различных по водности лет. Результаты этих вычислений представлены в табл. 94. Динамика площадей, занимаемых отдельными водными массами, показана на рис. 127.

В период весеннего наполнения водохранилища, когда уровень его непрерывно повышается, площади речных водных масс увеличиваются, а площадь водной массы центральной части уменьшается. С окончанием наполнения водохранилища картина меняется: площади речных вод быстро уменьшаются, а площадь, занимаемая водами собственно водохранилища, увеличивается. Если в мае и в начале июня она составляет 40—60% от всей акватории водоема, то в августе—октябре примерно 65—85%. Следует отметить, что изменение акватории речных вод и водной массы центральной части водохранилища происходит не только в результате

Процентное соотношение площадей и объемов водных масс в Рыбинском водохранилище

Дата съемки	Характеристики водохранилища на день съемки		Волжская		Моложская		Шекснинская		С б я н по ра илищ	
	уровень	площадь	объем	площадь	объем	площадь	объем	площадь	объем	площадь
1960 9 V 3 VI 28 VII 4 X 27 X	100.17	3762	18.68	12.1	10.3	15.3	14.4	15.6	11.3	57.0
	100.50	3910	19.94	14.8	11.2	17.2	16.6	24.8	18.0	43.2
	99.85	3618	17.45	7.3	6.8	3.9	2.8	12.0	8.6	76.8
	99.65	3528	16.76	4.2	4.1	4.3	2.9	13.0	8.8	78.5
	99.47	3447	16.15	4.4	4.2	4.3	3.0	15.4	11.0	75.9
1961 14—24 II 17—24 III 12 V 8 VI 3 VIII 10 X 13—15 XI 25—28 XII	99.65	3528	16.76	9.8	10.0	15.5	14.4	11.7	8.2	63.0
	99.45	3438	16.08	9.8	10.2	15.6	13.4	15.4	11.0	59.2
	101.87	4593	25.71	14.5	13.6	14.7	11.8	17.2	11.4	53.6
	102.11	4715	26.87	14.7	18.4	15.2	12.7	21.3	16.2	48.8
	101.80	4545	25.38	3.8	3.4	4.3	2.6	6.4	3.7	85.5
	101.28	4285	23.14	3.9	3.5	4.6	2.5	12.0	7.0	79.5
	100.83	4060	21.21	3.2	3.5	4.6	3.4	—	—	—
	100.05	3708	18.22	7.9	9.0	4.8	3.4	—	—	—
	99.28	3361	15.51	8.6	9.6	6.4	4.8	—	—	—
	98.08	2824	11.79	15.8	15.8	9.3	7.7	—	—	—
1962 30 I—7 II 29 III—6 IV 12 V 6 VIII 4 XI	101.81	4550	25.42	15.2	15.9	15.1	12.8	29.0	24.4	40.7
	101.85	4572	25.61	12.1	10.6	10.0	5.5	12.6	9.5	65.3
	101.31	4300	23.27	8.2	4.5	6.2	3.6	16.1	9.5	69.5
	99.37	3402	15.81	15.0	13.4	6.5	4.9	14.0	9.1	64.5
	98.47	2998	12.93	20.7	28.4	6.4	4.4	—	—	—
1963 30 I—7 II 18—20 IV 14 VI	100.50	3910	19.94	12.1	11.5	17.1	17.1	23.3	18.6	47.5

изменения уровня, но и в процессе трансформации этих вод при замедленном водообмене. С началом осенней сработки водохранилища картина снова меняется на обратную: площади речных водных масс увеличиваются, а площадь центральной части водоема уменьшается. Эта тенденция к изменению площадей основных водных масс в водоеме сохраняется обычно до конца очередного всенного наполнения водохранилища. Определение площадей, занимаемых основными водными массами водохранилища при различных уровнях за ряд лет, показало, что характер динамики их сохраняется из года в год.

Имея вычисленные площади различных вод в водохранилище на дату каждой синхронной съемки, нетрудно определить их объемы. В табл. 94 варяду с процентным соотношением площадей водных масс даны соотно-

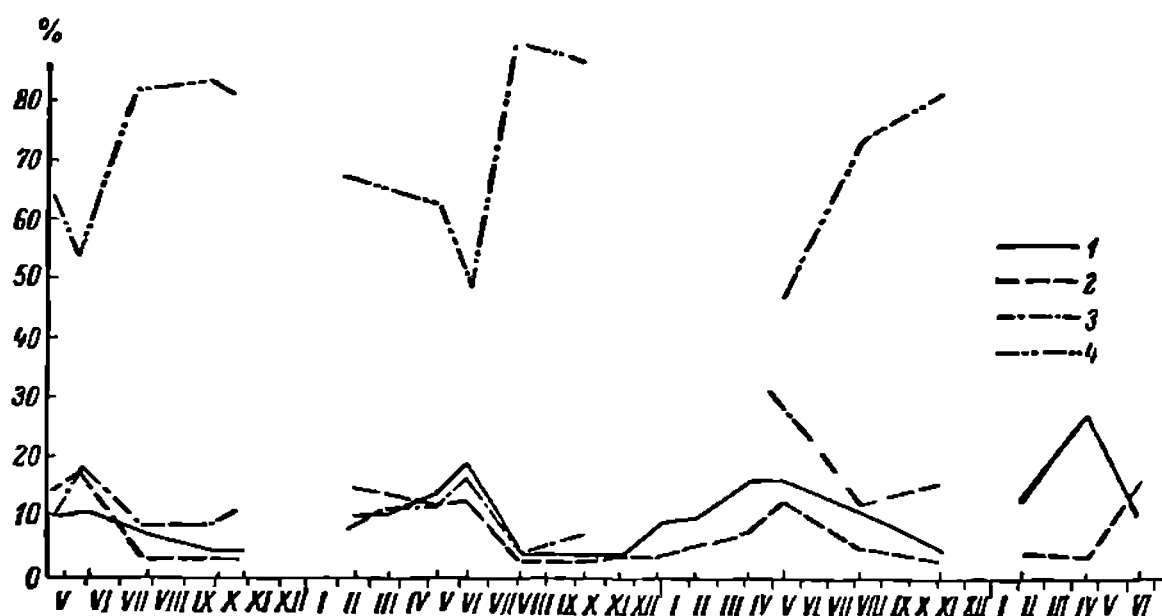


Рис. 127. Динамика площадей водных масс Рыбинского водохранилища на даты синхронных съемок.

1 — волжская водная масса; 2 — моложская водная масса; 3 — шекснинская водная масса; 4 — водная масса водохранилища.

шения и их объемов. Объемы речных вод в водоеме вычислялись как сумма частных объемов между изобатами в пределах границы водной массы, при этом площади участков водоема по отдельным изобатам определялись также планиметрированием. Объем водной массы центральной части водохранилища вычислялся как разность между объемом всего водоема, определенным по кривой объемов для соответствующего уровня, и суммой объемов речных вод.

Сопоставляя рис. 127 и 128, можно заметить, что в общем изменение объемов различных водных масс в Рыбинском водохранилище полностью соответствует характеру изменения площадей. С увеличением объема речных вод в водоеме уменьшается объем водной массы собственно водохранилища и наоборот. Обычно большей площади соответствует и больший объем водной массы. Но в силу морфометрических особенностей отдельных участков водохранилища и неравномерного поступления исходных водных масс, а также в зависимости от режима работы ГЭС это соотношение иногда нарушается. Так, в мае—июне 1964 г. площадь, занятая шекснинской водой, была значительно больше площади, занятой волжскими водами, но объем ее был заметно меньше объема последней (см. табл. 94).

Естественно, что по изменению объемов водных масс в течение года можно судить и об их динамике. Следовательно, некоторое представление о сезонной динамике различных водных масс в водоеме можно получить по кривым рис. 128. Анализ их показывает, что как в маловодные, так и

в многоводные годы свыше 50% объема воды водохранилища составляет водная масса центральной части. Наименьшее содержание ее в водоеме приходится на весну. Так, к 12 мая 1962 г. она составляла лишь 46.9%. Объем речных вод весной, наоборот, достигает максимума в годовом цикле и довольно равномерно распределяется между отдельными водными массами. К концу весеннего наполнения объем шекснинских вод обычно выше объема волжских и моложских и иногда достигает 24.4% от общего объема водной массы водоема, но в отдельных случаях волжские воды преобладают над шекснинскими. Так, 8 июня 1961 г. они составляли 18.4% от объема вод водохранилища, тогда как на долю шекснинских вод приходилось лишь 16.2%.

Летом объем водной массы центральной части водохранилища резко увеличивается, а объем речных вод соответственно уменьшается. На долю

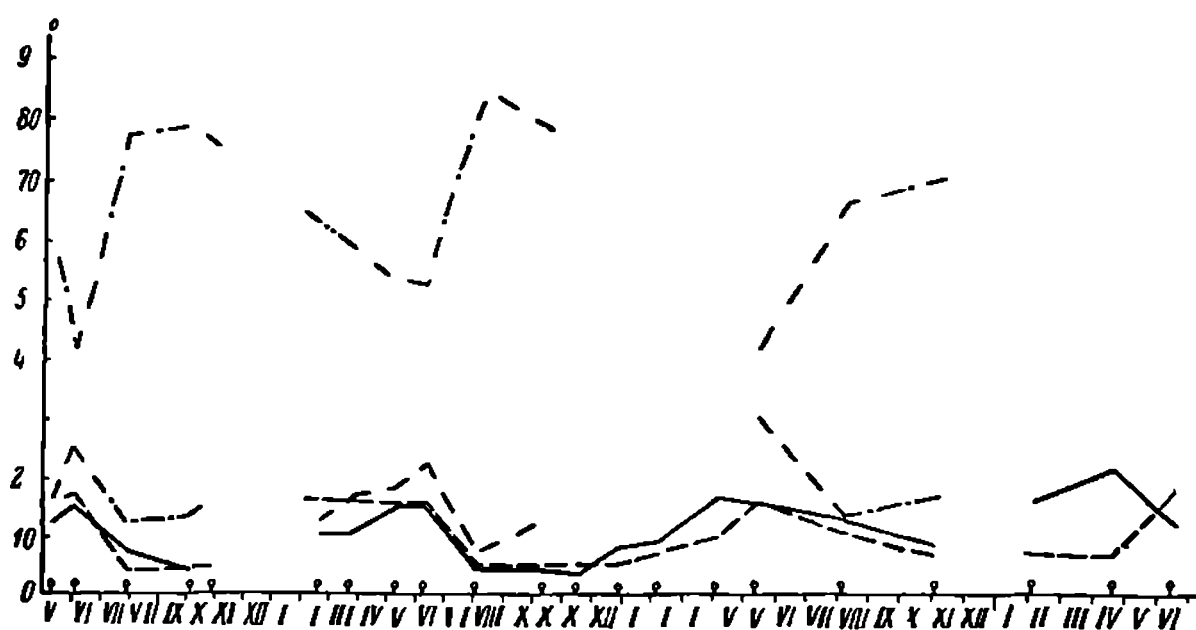


Рис. 128. Динамика объема водных масс Рыбинского водохранилища по датам синхронных съемок.

Условные обозначения те же, что и на рис. 127.

вод собственно водохранилища приходится от 74 до 90%. Из речных водных масс в этом сезоне наименьшей по объему является моложская, а наибольшей — шекснинская.

В осенний период объем речных вод остается примерно таким же, как и летом, иногда лишь незначительно увеличивается объем шекснинской воды. С началом зимней сработки водохранилища намечается тенденция к уменьшению объема водной массы центральной части и увеличению объема речных вод. Зимняя сработка водохранилища происходит главным образом за счет вод центральной части водоема, поэтому естественно объем последней систематически уменьшается. В то же время, несмотря на малый зимний сток, объем речных вод в водоеме зимой хотя и медленно, но увеличивается. Особенно резко возрастает объем волжской водной массы в связи с интенсивной сработкой верховолжских водохранилищ (см. рис. 128). В отдельные годы объем волжской воды к концу зимы в водохранилище достигает 28.4% (см. табл. 94).

Таким образом, соотношение водных масс в Рыбинском водохранилище в течение года остается постоянным. Каждая водная масса испытывает определенные сезонные изменения, которые в общих чертах сводятся к следующему. К концу весеннего наполнения водохранилища водная масса центральной части имеет минимальный объем, резко увеличивающийся летом в основном за счет трансформации речных вод и в летне-осенний период достигающий максимального. С началом зимней сработки водохранилища объем этой водной массы систематически уменьшается

до минимума в конце весны. Обратную картину представляет динамика речных вод. Весной объем их достигает максимума в годовом цикле, после чего наступает летне-осенний минимум. С началом зимней сработки водоема соотношение водных масс меняется в сторону увеличения доли речных вод. Такое соотношение сохраняется до конца весеннего наполнения водохранилища. Аналогичная картина наблюдалась К. К. Эдельштейном (1968) в Горьковском водохранилище.

Анализ водных масс ряда волжских водохранилищ позволил выявить не только особенности их сезонного распределения по акватории и вертикальную структуру, но дал возможность подсчитать площади и объемы различных водных масс. Имея эти данные, можно легко определить участие отдельных водных масс в тепловом и солевом балансе водоема, а также вычислить среднюю температуру и другие характеристики водоема.

Глава VI

ПЕРЕМЕЩЕНИЕ И ТРАНСФОРМАЦИЯ ВОДНЫХ МАСС В ВОДОХРАНИЛИЩАХ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА

В процессе анализа водных масс волжских водохранилищ наряду с картиной их распределения и сезонной динамикой выявляются некоторые особенности перемещения этих вод. Уже из распределения водных масс видно, что характер перемещения их, как и взаимодействие друг с другом, в различных водохранилищах и даже на отдельных участках одного и того же водоема по сезонам года сильно меняется. Интенсивность и особенности этих процессов в водохранилищах обуславливаются рядом факторов. Основными из них являются режим поступления исходных водных масс, характер сброса воды из водоема через сооружения гидроузла и ветровой режим. Существенное влияние на перемещение вод в водохранилищах оказывает также морфометрия водоема.

О втекании исходных водных масс в водохранилище

На проточность водохранилища, а следовательно, и на перемещение водных масс в нем существенное влияние оказывает поступление вод с его водосбора. К сожалению, до настоящего времени особенности процесса втекания отдельных потоков исходных водных масс в водоем замедленного водообмена изучены слабо. Одни исследователи, например Г. И. Попов (1948), Я. Ф. Плешков (1951), М. И. Кривенцов и другие (1953) считают, что при втекании потока в водоем происходит полное смешение поступающих вод притока с водами водохранилища. По мнению других, как М. И. Кривенцов (1954, 1957), О. А. Алекин (1948), П. П. Воронков (1951а), в крупных водохранилищах с большой проточностью воды притоков, частично смешиваясь с водной массой водохранилища, постепенно вытесняют ее при своем движении к плотине. Такого же мнения придерживается и А. А. Зенин (1961), который на примере Горьковского и Куйбышевского водохранилищ показал, что при перемещении водных масс в них от верховьев к плотине происходит вытеснение находящейся в водохранилищах воды вновь поступающими водами с частичным перемешиванием их как по ширине водоемов, так и вдоль оси. Подобная картина наблюдалась М. Г. Ериповой (1962) в волжском потоке Рыбинского водохранилища.

Исследование данного вопроса в последние годы проводилось и в лаборатории гидрологии Института биологии внутренних вод АН СССР (Эдельштейн, 1965а, 1965б, 1968; Буторин и Эдельштейн, 1965). Как показали полученные результаты, в водохранилищах волжского каскада процесс втекания вод каждого из отдельных притоков в водоем замедленного водообмена происходит по-разному. Наиболее характерными случаями втекания являются следующие: втекание крупного притока на приплотинной участке водохранилища; втекание малого притока на этом же

участке; втекание притока на верхнем участке водохранилища, режим которого зависит от пусков вышерасположенного гидроузла, и поступление вод основной реки, питающей водохранилище. Последний случай будет рассмотрен нами особо на примере Волги в районе Ивановского водохранилища в связи с изучением трансформации волжской воды в каскаде водохранилищ.

На приплотинном участке водохранилища воды притоков первоначально поступают в обширные и глубоко вдающиеся в сушу приустьевые заливы, которые образуются в результате затопления нижних участков долин этих притоков. Верхние и средние участки таких заливов в течение всего года постоянно заняты речной водной массой, поступающей с водосбора. В период половодья и дождевых паводков речная водная масса целиком заполняет соответствующий приустьевой залив и выходит за его пределы, занимая значительные по площади районы водохранилища. Во время летней межени зона смешения речной водной массы с водохранилищной обычно находится в пределах нижнего приустьевого участка залива и не выходит за его пределы. В зимний период воды притоков, как правило, проникают в открытые части водохранилища по затопленным речным руслам, подтекая под водную массу водохранилища.

Вследствие постепенного увеличения ширины и глубины приустьевого залива от верховьев к водохранилищу скорость перемещения речных вод с приближением к открытым частям водоема постепенно уменьшается. Величина средней скорости перемещения речных вод в приустьевых заливах тесно связана с расходом воды притока в его замыкающем створе. С увеличением расхода воды скорость перемещения вод возрастает, и наоборот. В связи с этим воды ядра паводка движутся быстрее, чем воды его начальной стадии, в результате чего ширина зоны смешения речных вод и водных масс водохранилища сокращается, а горизонтальные градиенты показателей водных масс сильно возрастают.

О течении описанного процесса можно судить по изменению данных электропроводности воды в приустьевом заливе Немды Горьковского водохранилища, полученных 20 июля и 1 августа 1962 г., а также значения горизонтального градиента этой характеристики на продольном разрезе данного залива. В указанном случае средняя скорость перемещения вод ядра паводка, рассчитанная по изменению электропроводности, составляла около 1.0 см/сек., в то время как скорость перемещения фронтальной зоны составляла менее 0.7 см/сек. Более полное представление о скорости перемещения вод в приустьевых заливах крупных притоков Горьковского водохранилища можно получить из табл. 95 (Эдельштейн, 1965б).

Средние расчетные скорости перемещения водных масс указывают, с одной стороны, на постепенное замедление движения речных вод в приустьевых заливах рек Унжи и Немды, а с другой — на различие их по абсолютной величине. Скорость перемещения вод в заливе Унжи оказалась более высокой, и, следовательно, водообмен в нем более интенсивный, чем в заливе Немды. Если сопоставить интенсивность водообмена этих заливов с интенсивностью водообмена водохранилища в целом, то оказывается, что первая за рассматриваемые периоды была в 2.5—4 раза выше, чем средняя для всего водохранилища (Эдельштейн, 1965б).

В отличие от крупных притоков половодье на малых реках, впадающих в водохранилище, проходит обычно при уровне в водоеме, значительно меньшем НПУ. В это время приустьевые заливы малых притоков интенсивно промываются речными водами. Позднее в результате быстрого подъема уровня в водоеме за счет вод половодья основных притоков воды из открытых частей водохранилища проникают в низовья залива и, как более холодные и плотные, располагаются под водной массой притока.

Расчет скорости перемещения вод рек Унжа и Немды по их приустьевым заливам
(по К. К. Эдельштейну, 1968)

Пункт	Электропро- водность, мксим см	Процент грунтового питания	Расход воды м сек	Дата пр х жде ний расхода в створе ГМС	Длина пути перемещения вод 1 м	Время пере- мещения вод, сутки	Средняя ск- сть перемен- ения 1 м сут и см сек
р. Унжа 2 VII 1961							
Сел. Николо-Макарово	250	59	55	29 VI	46	5	9 2 10 6
Дер. Гребенец	233	54	59	20 VI	55	12	4 6 5 3
Дер. Сокорново	200	44	73	15 VI	60	17	3 5 4 0
Дер. Козлово	184	39	82	12 VI	66	20	3 3 3 8
Дер. Кобылино	145	27	118	8 VI	75	27	2 8 3 2
20 VI 1962							
Дер. Горчуха	233	54	63	18 VI	30	2	15 0 17 4
Сел. Николо-Макарово	227	52	65	15 VI	46	5	9 2 5 3
Дер. Гребенец	217	49	69	13 VI	55	7	7 1 8 2
Дер. Козлово	196	43	78	10 VI	66	10	6 6 7 6
Дер. Кобылино	154	30	112	4 VI	75	17	4 4 5 1
р. Немда 1 VII 1961							
Дер. Ново-Березовец	174	79	5.1	28 VI	38	3	12.3 14.2
Дер. Куспа	154	68	7.5	17 VI	43	14	3 1 3 6
Дер. Хороброво	126	52	9.8	5 VI	48	26	1 8 2 1
Дер. Лубяны	107	42	12.1	1 VI	52	30	1 7 2 0

Примечание. По р. Унже створ ГМС расположен у г. Макарьева, по р. Немде у дер. Седяще,

Фронтными раздел этих водных масс совпадает со слоем температурного скачка, причем относительно более минерализованные воды притока перекрывают менее минерализованные воды водохранилища. Подобное явление в более крупных масштабах наблюдается весной в Иваньковском водохранилище. В этом водоеме четко прослеживается натекание прогретых вод речного участка водохранилища на более холодные и менее минерализованные придонные воды приплотинной части. В отдельные годы этот процесс протекает настолько интенсивно, что воды речного участка в поверхностном слое прослеживаются до плотины (Рутковский, 1964).

В узких и извилистых приустьевых заливах по малым притокам, где ветровое воздействие на водные массы невелико, вертикальная неоднородность вод обычно сохраняется до начала осеннего выхолаживания, т. е. до окончательного смешения водных масс и последующего их вытеснения из залива осенними речными водами.

Весьма своеобразен режим втекания вод притоков, впадающих в водохранилище волжского каскада на верхних участках, являющихся, по существу, нижним бьефом расположенных выше гидроэлектростанций. Характерным примером подобного типа втекания речных вод в водоем может служить р. Которосль в пределах речной части Горьковского водохранилища.

Для режима приустьевого участка этой реки характерен хорошо выраженный суточный ритм в течение большей части года, обусловленный неравномерным внутрисуточным режимом пусков Рыбинской ГЭС. В ночные часы, когда сбросы Рыбинского гидроузла невелики, наблюдается сток вод Которосли в волжское русло, где и происходит смешение их с волжской водой. В утренние часы (спустя 3—5 часов после начала интенсивного сброса воды Рыбинской ГЭС) уровень воды у Ярославля настолько поднимается, что в русле Которосли образуются обратные уклоны. Воды из Волги поступают в устье притока и зона контакта вод Которосли с волжской перемещается вверх по заливу. В периоды небольших суточных сбросов Рыбинской ГЭС воды Которосли накапливаются в приустьевом участке реки, практически не поступая в волжское русло. Наиболее значительные объемы их вливаются в водоем в период спада уровня в волжском русле после резкого уменьшения сбросов Рыбинским гидроузлом.

Исследование данного вопроса показало, что особенности втекания исходных водных масс в водохранилище определяются взаимодействием ряда факторов, важнейшими из которых являются объем стока притока, его изменчивость во времени, уровенный режим водохранилища и соотношение плотности вод притока и водоема.

Особенности перемещения водных масс в водохранилищах различного типа

Перемещение водных масс в водохранилищах непосредственно связано с режимом течений и волновых процессов. Особенности этого режима в волжских водохранилищах рассмотрены нами в соответствующих разделах работы. Поскольку в таких водохранилищах, как Иваньковское и Угличское, волновые процессы не играют существенной роли в динамике вод, перемещение последних связано лишь со скоростным режимом. Циркуляция вод в подобных водоемах довольно проста. Она сводится к переносу вод стоковыми течениями в сторону плотины, откуда они сбрасываются в нижележащее водохранилище каскада. Время пребывания вод в этих водохранилищах обычно невелико и трансформация исходных водных масс незначительна. Порядок скоростей перемещения вод на от-

дельных участках этих водоемов и особенности переноса рассмотрены в разделе о течениях в водохранилищах.

Значительно сложнее циркуляция вод в Рыбинском водохранилище. Для характеристики перемещения водных масс в этом водоеме не достаточно оказалось располагать только данными непосредственных измерений скорости и направления течения. Помимо этих данных, пришлось использовать косвенные показатели: распределение температуры, электропроводности и других характеристик водных масс. Еще в процессе ана-



Рис. 129. Положение границ речных водных масс в феврале (II) и марте (III) 1961 г.

1 — волжская водная масса; 2 — моложская водная масса;
3 — шекснинская водная масса; 4 — водная масса водохранилища.

лиза водных масс Рыбинского водохранилища выяснилось, что за перемещением можно проследить по изменению положения границ. Сопоставление положения границ водных масс от съемки к съемке в годовом цикле позволяет составить представление о путях и скорости перемещения их на отдельных участках водоема. Иными словами, об интенсивности перемещения той или иной водной массы можно судить по изменению положения ее фронтальной зоны, или границ между водными массами, а в отдельных случаях по изменению положения ядра вод (Эдельштейн, 1965б).

Используя указанный прием, проследим за перемещением водных масс в Рыбинском водохранилище в 1961 г., когда границы между водными массами во все сезоны были выражены наиболее отчетливо.

В результате обильных осадков и оттепели уровень водохранилища в конце 1960 г. начал повышаться и к январю 1961 г. поднялся примерно на 0.7 м, главным образом за счет сбросов Угличской ГЭС и стока Мологи. Это непосредственно отразилось на распределении водных масс в водоеме.

Результаты последней осенней съемки 1960 г., проведенной 29 октября, показали, что до начала осенне-зимнего повышения уровня граница волжской водной массы проходила несколько севернее Шуморовского острова, моложские воды доходили до Первомайских островов, а шекснинские — до района пос. Мякса. При первой зимней съемке в 1961 г., выполненной 14—24 февраля, картина была иная (рис. 129): волжские воды занимали уже всю южную часть водохранилища. Мощный поток их глубоко вклинивался в воды центральной части водоема. Граница между волжскими водами и водной массой центральной части определялась сравнительно легко. Труднее в результате этой съемки оказалось определить границу моложских вод, так как из-за смешения паводочных вод Мологи и ее притоков с водами центральной части водохранилища в этом районе наблюдалась большая пятнистость в распределении характеристик водных масс. В связи с этим положение границы моложских вод для данной съемки было принято условно. Наоборот, граница между шекснинскими водами и водной массой центральной части водохранилища прослеживалась вполне отчетливо, а в приустьевых участках Ухры и Согожи выделялись воды этих рек.

Изменение положения границ водных масс от октября к февралю позволяет вычислить приблизительно среднюю скорость перемещения вод за этот период. Так, волжские воды продвигались в центральную часть водохранилища со скоростью 0.2 км/сутки, моложские по старому руслу двигались в направлении Рыбинской ГЭС несколько быстрее (0.27 км/сутки) и лишь положение границы шекснинской водной массы вследствие малого стока с этой части бассейна практически не изменялось.

Более четко и надежно определены границы водных масс во время второй зимней съемки 1961 г., выполненной 17—24 марта во время интенсивной сработки водохранилища (см. рис. 129). При сопоставлении характера распределения водных масс в феврале и марте видно, что за время, прошедшее между этими съемками, особенно заметно продвинулась в открытую часть водохранилища моложская водная масса. Продвижение моложских вод было настолько значительным, что они достигли района бывшего сел. Горькая Соль и вошли в непосредственный контакт с волжскими водами. Волжская водная масса за это время распространилась почти до центра водохранилища и продвигалась значительно медленнее, чем в начале зимы. Как и в предшествующую съемку, волжские воды составляли значительную долю вод, сбрасываемых в Горьковское водохранилище. Вдоль русла Шексны шло продвижение к центру водохранилища шекснинских вод и граница их с водной массой водохранилища заметно сместилась к югу.

Сопоставляя положение границ между водными массами во время этих двух съемок, можно получить представление не только о направлении, но и о скорости их перемещения. Из рис. 129 видно, что скорость перемещения различных водных масс неодинакова. Если граница волжской водной массы от февраля к марту своего положения почти не изменила, то граница моложских вод продвинулась по ходу их на 16—18 км, а шекснинских — на 15 км, что соответствует средней скорости перемещения около 0.5 км/сутки.

К сожалению, при использовании этого приема трудно определять скорость перемещения водной массы центральной части водохранилища, хотя известно, что и в данном районе зимой происходит передвижение вод не только по затопленным руолам рек, но и на пойменных участках в процессе скатывания с мелководий при сработке водохранилища.

Положение границ водных масс в весенний период показывает (рис. 130), что к концу весеннего наполнения водохранилища объем волжских и моложских вод по сравнению с их объемом зимой заметно умень-

Т а б л и ц а 96

Скорость (в км/сутки) перемещения границ водных масс в Рыбинском водохранилище

Время съёма	Число суток между съёмами	Волжская		Моложская	Шекснинская
		поток по Пущице	поток по Мологе		
1960					
9 V — 3 VI	31	0.06	0.23	0	0.42
12 — 28 VII	16	1.0	—	0.2	0
28 VII — 4 X	68	0	—	0	0.07
4 — 29 X	25	0	—	0	0.16
1961					
29 X 1960 — 19 II 1961	113	0.20	0.22	0.27	—
19 II — 20 III	29	0.05	0.05	0.55	0.5
22 IV — 12 V	20	1.8	—	—	—
12 V — 8 VI	27	0	0.44	0	1.0
3 VIII — 10 X	38	0.10	—	0	—
10 X — 14 XI	35	0	—	0.6	—
14 XI — 27 XII	43	0.40	0.42	0.11	—
27 XII 1961 — 3 II 1962	38	0.24	0.20	0.21	—
1962					
3 II — 2 IV	24	—	0.45	0.63	—
6 VIII — 4 XI	90	—	0.13	—	—
4 XI 1962 — 30 I 7 II 1963	92	0.20	0.20	0.15	0.13
1963					
30 I — 7 II 18 — 20 IV	75	0.07	0.07	0.10	0
3 VIII — 3, 4 IX	31	0.22	—	0.60	—
3, 4 IX — 21 XI	78	0	—	0.2	—
21 XI — 26 XII 1963 — 4 I 1964	40	0.45	0.25	0.3	—
1964					
4 I — 25 II — 3 III	60	0	0.15	0.03	—
3 III — 11 — 15 IV	44	0.08	0.10	0.10	—

шился. На это указывают и данные табл. 96. В конце весны смещение границы волжской водной массы наблюдалось главным образом в сторону моложского участка и проходило со средней скоростью, равной примерно 0.4 км/сутки. Граница моложских вод с водами центральной части практически не изменила своего положения. Некоторое смещение ее по ходу потока отмечалось лишь по руслу Мологи. Устойчивое положение границ основной части волжского и моложского потоков объясняется тем, что ко второй половине мая основная часть весенних вод Волги и Мологи уже поступила в водохранилище и приток этих рек в период с 12 мая по 8 июня был сравнительно мал. В Шексне половодье наблюдается позднее, чем в Волге и Мологе, и основная часть его вод приходит в водоем во второй половине мая и в июне. В это время и происходит заметное продвижение шекснинских вод в центральную часть водохранилища, что отражается на положении границ между соответствующими водными массами. За рассматриваемый промежуток времени граница шекснинских вод сместилась к югу примерно на 27 км, следовательно, шекснинская водная масса перемещалась со скоростью около 1 км/сутки.

Весьма показательным для характеристики перемещения водных масс в водохранилище является и положение границ между этими массами в летне-осенний период (рис. 131). На данном рисунке хорошо видны особенности перемещения границ водных масс по ходу основных потоков. Как положение границ, так и скорости их смещения (см. табл. 96) указывают на то, что в летний период и в начале осени перемещение водных масс незначительно. Только с началом интенсивной сработки водохранилища скорость перемещения их резко возрастает.

Несмотря на некоторые особенности гидрометеорологических условий, можно считать, что рассмотренный нами 1961 г. в отношении интенсивности перемещения водных масс является характерным для Рыбинского водохранилища.

Объективность наших представлений о скорости перемещения водных масс по изменению положения границ между ними подтверждается данными инструментальных измерений скоростей течения в водохранилище. При характеристике скоростного режима в нем было отмечено, что в перемещении водных масс и в общей циркуляции вод зимой и весной основную роль играют стоковые течения. Но даже в эти сезоны в центральной части водохранилища и на примыкающих к ней речных участках скорости течения, как правило, невелики. Так, в районе бывшего г. Мологи скорость течения зимой лишь в отдельных случаях достигает 0.10—0.13 м/сек.

Еще слабее выражено перемещение моложских и шекснинских вод.

До сооружения Череповецкого гидроузла скорости течения свыше 0.03 м/сек. в шекснинском потоке зимой отмечались лишь севернее сел. Гаятино. Отдельные измерения показали, что в центральной части водохранилища скорости перемещения вод также незначительны. Средние скорости на вертикалях разреза от Рожновского мыса до Пункта открытого моря (ПОМ) равны примерно 0.004—0.013 м/сек. Такие же скорости потока отмечаются в районе бывшего сел. Наволока, но к северо-востоку от него с приближением к руслу Шексны они постепенно увеличиваются до 0.03 м/сек. С выходом на левую пойму Шексны скорость течения снова уменьшается и в 5 км от бывшего сел. Городка в направлении бывшей дер. Давшино не превышает 0.02 м/сек., а у Давшино составляет менее 0.01 м/сек. Таким образом, скорости перемещения водных масс для периода ледостава, рассчитанные по изменению положения их границ, и скорости течения, измеренные инструментально, примерно одного порядка.



Рис. 130. Положение границ речных водных масс в мае—июне (V—VI) 1961 г.

Условные обозначения те же, что и на рис. 129

В процессе наполнения водохранилища и повышения уровня стоковые течения в зоне подпора ослабевают и скорости их уменьшаются. В летне-осенний период основные потоки вод по старым руслам рек Волги, Мологи и Шексны выражены слабо и



Рис. 131. Положение границ речных водных масс в августе (VIII), октябре (X), ноябре (XI) 1961 г.

Условные обозначения те же, что и на рис. 129.

ное поверхностное течение некоторое время может быть направленным навстречу ветру. При продолжительных и устойчивых ветрах в придонном слое могут возникать противотечения, которые иногда с ослаблением ветра захватывают всю водную толщу.

и Шексны выражены слабо и выклиниваются по ходу воды заметно выше, чем в предшествующие сезоны. В центральной части водохранилища и на прилегающих к ней участках на перемещение водных масс значительное влияние оказывают ветровые течения. Как показали наши исследования, в летне-осенний период решающая роль в циркуляции вод принадлежит ветру, непосредственно возбуждающему перемещение водных масс.

В связи с этим остановимся несколько подробнее на характеристике переноса вод в открытой части водоема ветровыми течениями. Исследования ветровых течений Рыбинского водохранилища показали, что в центральной части его направление перемещения водных масс не всегда совпадает с направлением ветра и меняется неодновременно с его изменением. При резком изменении направления ветра на противоположное

Таблица 97

Скорости и направление ветра и течения у Бабинских островов 31 мая 1963 г.

Время, час. мин.	Ветер		Горизонт, м			
	скорость, м/сек.	направление, град.	поверхностный (0—1)		глубинный (2—3)	
			скорость, м/сек.	направление, град.	скорость, м/сек.	направление, град.
11 07	10.0	40	0.05	174	0.04	171
18 10	6.9	20	0.05	176	0.01	171
20 07	7.2	30	0.05	192	0.02	172

Подтвердим это несколькими примерами. Наиболее простой случай — перенос вод по ветру. Так, 31 мая 1963 г. в районе Бабинских островов при устойчивом север-северо-восточном ветре со скоростью от 9 до 11 м/сек. (в порывах до 14 м/сек.) перемещение всей толщи водной массы имело устойчивое южное направление (табл. 97) и скорость его постепенно уменьшалась с глубиной.

При ослаблении скорости ветра того же направления до 1.4—4.4 м/сек. в поверхностном слое уменьшилась скорость течения, направление которого совпадало с направлением ветра. Аналогичная картина наблюдалась также 8 июня 1963 г. у ПОМ при север-северо-восточном ветре со скоростью 5—7 м/сек. (табл. 98). С увеличением скорости ветра до 8—9 м/сек. (в порывах до 17 м/сек.) 9 июня скорость ветрового течения увеличилась, а направление сохранилось прежним.

Таблица 98

Скорости и направление ветра и течения у ПОМа 8 июня 1963 г.

Время, час. мин.	Ветер		Горизонт, м			
	скорость, м/сек.	направление, град.	поверхностный (0—1)		глубинный (3—4)	
			скорость, м сек.	направление, град.	скорость, м сек.	направление, град.
10 25	8.1	360	0.03	212	—	—
12 07	7.1	360	0.09	129	0.05	120
14 17	3.8	335	0.07	122	0.05	110
16 10	4.3	260	0.07	105	0.03	114
18 15	7.3	330	0.06	122	0.05	120

Однако не всегда движение всей водной толщи направлено по ветру. В центральной части водохранилища особенно в конце весны, когда наблюдается устойчивое термическое расслоение водной толщи, в отдельных случаях воды эпилимниона расслаиваются на два подслоя и движение вод в них происходит с различными скоростями и часто в различных направлениях (табл. 99). Скорости перемещения менее плотных вод эпилимниона по более плотным и менее подвижным водам гиполимниона составляют в среднем 0.06 м/сек., а в отдельных случаях достигают 0.14 м/сек. (Эдельштейн, 1963б). Таким образом, при наличии термического расслоения вод водохранилища воздействие ветра на водную поверхность не вызывает полного перемешивания, а приводит лишь к горизонтальному переосу вод.

Таблица 99

Скорости и направление течений при северо-западном ветре со скоростью 3—5 м/сек. 5 июня 1961 г.
(по К. К. Эдельштейну, 1963)

Время, час. мин.	Поверхность		3 м		5 м	
	скорость, м/сек.	направление	скорость, м сек.	направление	скорость, м/сек.	направление
9 50	0.038	Ю	—	—	0.014	Ю
11 15	0.048	Ю	—	—	0.025	Ю
12 35	0.083	Ю	0.067	ЮЗ	0.007	Ю
13 45	0.071	ЮВ	0.019	ЮЗ	0.006	СЗ
18 40	0.056	Ю	0.007	СЗ	0.008	СЗ
20 00	0.033	ЮЗ	0.026	СЗ	0.025	СЗ

При неустойчивых летних ветрах устойчивой ветровой циркуляции вод в водохранилище не наблюдается. На мелководных участках центральной части водоема перемещение вод обычно направлено по ветру с незначительными отклонениями от него как вправо, так и влево. Скорость перемещения их, особенно в поверхностном слое, находится в непосредственной зависимости от скорости ветра и с глубиной она обычно затухает.

Так, наблюдения выполненные А. С. Литвиновым у ПОМа 5 июля 1963 г., показали, что при скорости ветра 6—9 м/сек. скорость течения на поверхности изменялась от 0.04 до 0.08 м/сек., а в слое 1.5—2.5 м она не превышала 0.02 м/сек (табл. 100).

Т а б л и ц а 100

Скорости и направление ветра и переноса вод у ПОМа 5 июля 1963 г.

Время, ч с мин	Ветер		Горизонт			
	ср. скорость, м/сек.	направление	поверхностный (0—1 м)		глубинный (1.5—2.5 м)	
			скорость, м/сек.	направление, град.	скорость, м/сек.	направление, град.
8 30	6.0	ССЗ	0.04	164	—	—
10 20	8.5	ССЗ	0.05	137	0.01	71
12 10	9.0	С	0.04	186	Стоит на месте	
14 17	8.0	ССЗ	0.07	192	—	—
16 20	8.0	ССВ	0.04	180	0.02	198
18 05	8.0	ССВ	0.08	223	—	—
20 17	8.0	ССВ	0.03	207	—	—

В ряде случаев направление перемещения вод значительно отклоняется от направления ветра. О сложности ветрового переноса вод в летний период можно составить представление по данным наблюдений у бывшего сел. Наволок в августе 1963 г.

По данным метеорологических станций ПОМ и мыс Рожновский, в центральной части водохранилища 20 августа преобладал восточный и юго-восточный ветер со скоростью 5—12 м/сек., который 21 августа изменил направление на юг-юго-западное и запад-юго-западное с уменьшением скорости до 2—5 м/сек. При таком ветре в районе бывшего сел. Наволок 21 августа воды перемещались в восточном направлении, а скорость их движения в 16 час. составляла 0.02 м/сек. К 18 час. при сохранении направления перемещения вод скорость движения в поверхностном слое увеличилась до 0.06 м/сек. В это же время в слое 2—3 м скорость перемещения вод не превышала 0.01 м/сек., а направление переноса было весьма неустойчиво. С глубиной скорость переноса вновь увеличивалась и в слое 5—6 м составляла 0.02 м/сек., а перемещение их имело юго-восточное направление.

В ночь с 21 на 22 августа ветер с юго-западного изменился сначала на южный, а затем на юго-восточный и восточный. Скорость его колебалась от 1.6 до 5.5 м/сек. В связи с изменением направления ветра перемещение вод в поверхностном слое 22 августа стало неустойчивым. В 11 час. оно имело северное направление и отклонялось от направления ветра на 40° вправо, а к 12 час. 40 мин. приняло север-северо-восточное направление и продолжало отклоняться сначала к востоку, а затем к югу. В 15 час. 40 мин. в поверхностном слое исследуемого района водная масса перемещалась на юго-восток, т. е. в направлении, противоположном направлению ветра. В глубинных слоях перемещение вод имело более устойчивое направление: в слое 2—3 м — на юг, а в слое 5—6 м — на юго-запад. Скорость перемещения вод на этих горизонтах была выше, чем на поверхности (табл. 101).

Несмотря на то, что в осенний период ветры более устойчивы по направлению и продолжительности, чем летом, ветровые течения в водоеме осенью выражены также слабо.

Как показали наблюдения, выполненные в районе бывшего сел. Наволок в октябре 1964 г., даже при сильном ветре устойчивых ветровых течений постоянного направления в водохранилище не наблюдается.

Скорости и направления ветра и переноса вод у бывшего сел. Наволок
22—23 августа 1963 г.

Время, час. мин.	Ветер		Горизонт					
	скорость, м сек.	направ- ление, град.	поверхностный		глубинный (2 3 м)		придонный (5 6 м)	
			скорость, м сек.	направ- ление, град.	скорость, м сек.	направ- ление, град.	ско- рость, м сек.	направ- ление, м сек.
22 VIII								
11 12	4.5	165	0.02	358	0.02	163	0.05	192
12 40	3.0	155	0.02	25	0.04	166	0.05	205
14 10	2.5	130	0.01	112	0.05	187	0.04	218
15 40	1.8	120	0.02	139	0.06	190	0.04	203
17 10	1.6	95	0.01	248	0.04	194	0.03	229
18 40	1.8	75	—	—	0.05	201	0.02	196
23 VIII								
7 30	7.0	130	0.02	269	0.02	205	0.03	208
8 40	5.8	125	0.03	284	0.02	211	0.04	199
10 10	5.6	110	0.03	262	0.04	192	0.06	197

При малой глубине и сложном рельефе дна ветровое воздействие на водную поверхность вызывает прежде всего волнение, которое сопровождается колебательными движениями водной массы без направленного ее переноса. Естественно, что и при таком движении происходит некоторое перемещение водной массы, но оно не представляет собой ветрового течения, которое в Рыбинском водохранилище в чистом виде встречается очень редко и существует, вероятно, лишь при ветровом нагоне. Это хорошо подтверждается данными наблюдений, выполненными А. С. Литвиновым (табл. 102).

Из табл. 102 видно, что при постоянном северо-западном ветре с преобладающей скоростью 4—8 м/сек. в центре водохранилища перемещение вод со скоростью от 0.04 до 0.09 м/сек. не представляет направленного течения и трудно увязывается с направлением ветра. На отсутствие ветровых течений и связанного с ними переноса водных масс в осенний период указывают не только инструментальные наблюдения, но и косвенные признаки (распределение химических и физических характеристик водных масс).

Особенности перемещения водных масс в Рыбинском водохранилище под воздействием ветра хорошо согласуются с теоретическими исследованиями В. Б. Штокмана (1953). Изучая влияние рельефа дна и поперечной неравномерности ветра на горизонтальную циркуляцию вод в мелком море или водохранилище, этот автор пришел к выводу, что в мелком море при движении водной массы трение о дно должно преобладать над боковым трением. Вследствие близости дна в мелком море или водохранилище развиваются преимущественно вихри с горизонтальной осью вращения, вызывающие интенсивное вертикальное перемешивание вод. Одновременно с этим вихри с вертикальной осью вращения, обуславливающие горизонтальный обмен, в значительной степени гасятся трением о дно. Таким образом, в результате преобладания в мелком море или водохранилище вертикального обмена над горизонтальным наблюдается почти полная вертикальная однородность воды при наличии горизонтальной неоднородности.

Эти теоретические положения В. Б. Штокмана полностью подтверждаются натурными наблюдениями на Рыбинском водохранилище.

Скорости и направления ветра и поверхностных вод у бывшего сел. Наволок 28—30 октября 1964 г.

Дата		Ветер	Г ризонт м																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
			5—0,8		2		4		7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
			время, ча мн	ко- рость, м сек.	в прав- ление, град.	время, час. мин	ск. рость, м/сек	напр в- ление град		время ч с. мин.	ско- рость м/сек	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град	время ч с. мин.	ко- рость м.	на- правление град

П р и м е ч а н и е. Течение на поверхности (0.5—0.8 м) измерялось поплавками, а на остальных горизонтах — морской модернизированной вертушкой

При отсутствии ледяного покрова в нем отмечается значительная однородность водных масс по вертикали и большая неоднородность их в горизонтальном направлении. Исследуя для определения состава вод водохранилища их электропроводность, мы установили, что в весенне-летний период, когда вся поверхность водоема подвержена воздействию ветра, электропроводность вод по вертикали меняется незначительно. Даже весной максимальные величины ее в большинстве случаев превышают минимальные лишь на 10—20%. С увеличением ветрового воздействия на водные массы в осенний период распределение электропроводности в водоеме становится еще более однородным.

При отсутствии ветрового воздействия в зимний период однородность водной массы по вертикали нарушается и наблюдается заметное расслоение ее толщи: меньшая электропроводность — в поверхностных слоях и большая в придонных. Максимальные величины электропроводности в слабопроточных районах водохранилища зимой иногда превышают минимальные на 50% и выше.

Совершенно иная картина наблюдается в горизонтальном распределении водных масс. Горизонтальная неоднородность вод водохранилища отчетливо прослеживается во все сезоны года (Рыбопромысловый атлас Рыбинского водохранилища, 1963; Буторин, 1965б; Буторин, 1966). Особенно велика она весной, когда часто максимальные величины электропроводности превышают минимальные на 200% и выше. Заметная неоднородность вод между отдельными участками Рыбинского водохранилища наблюдается и в летне-осенний период.

В. Б. Штокман установил, что, кроме поперечной неравномерности ветра, на горизонтальную циркуляцию вод в мелком море или водохранилище существенное влияние оказывает рельеф дна. Исследуя влияние рельефа дна на горизонтальную циркуляцию вод и решая вопрос о противотечениях, обусловленных поперечной неравномерностью ветра в мелком море или водохранилище, он показал, что возможность возникновения противотечения в поперечном сечении мелкого водоема переменной глубины зависит не только от поперечной неравномерности касательного трения ветра, но и от глубины, причем возможность противотечения увеличивается с возрастанием последней. «При всех прочих равных условиях, противотечение вероятнее ожидать в желобообразных углублениях дна мелкого моря или водохранилища, нежели в мелководных их частях» (Штокман, 1953, стр. 19). Аналогичная картина наблюдается и при равномерном ветре. В море переменной глубины при равномерном ветре противотечение также приурочено к впадинам-желобам, а в наиболее мелких частях поперечного сечения моря вода от поверхности до дна движется по ветру.

Такая картина неоднократно наблюдалась и в Рыбинском водохранилище. Так, 22 августа 1963 г. в центральной части водохранилища при юго-восточном ветре со скоростью 2.2—4.5 м/сек. отмечено течение, которое в поверхностном слое по направлению совпадало с направлением ветра, тогда как в придонном слое существовало четко выраженное противотечение. В то же время вблизи берегов и на мелководьях течение захватывало всю толщу воды от поверхности до дна и даже при слабых ветрах соответствовало направлению ветра.

Таким образом, как характер перемещения водных масс, так и распределение их по акватории Рыбинского водохранилища хорошо согласуются с теоретическими представлениями В. Б. Штокмана о горизонтальной циркуляции вод в мелководном водоеме под воздействием ветра.

Опыт определения скорости перемещения водных масс по распределению характеристик использован М. Г. Ершовой (1968) при исследовании водных масс Шекснинского водохранилища. Сопоставление характера

распределения температурной воды по продольному профилю шексинской части водохранилища на 24 и 28 мая 1964 г. позволило ей ориентировочно рассчитать скорость перемещения волозерских вод на отдельных участках. Так, по значениям электропроводности и оптического показателя цветности, воды, находившиеся 25 мая у дер. Горицы, к 28 мая продвинулась несколько восточнее местонахождения Деревеньки. В данном случае средняя скорость перемещения ее составляла 0,10 м/сек. В районе сизьменского расширения средняя скорость перемещения воды от дер. Пилоницы в сторону ГЭС равнялась около 0,03 м/сек., а в районе дер. Черная Гряда — 0,04–0,05 м/сек.

Скорость течения, измеренная в это же время вертушкой Ж-8 у дер. Горицы на поверхностном горизонте составляла 0,3 м/сек., у дер. Пилоницы — менее 0,04 м/сек., а у дер. Черная Гряда — 0,05 м/сек. на поверхностном горизонте и 0,11 м/сек. у дна. Таким образом, средняя скорость перемещения подлой массы в шексинской части водохранилища, определенная последним путем, довольно близка к замеренной инструментально. Есть основания предполагать, что приведенные значения скоростей для соответствующих участков водоема являются минимальными значениями, так как расходы воды через гидроузлы достигали в это время наибольших величин за весенний период.

Из приведенных разделов видно, что Горьковское водохранилище по морфометрии и гидрологическому режиму существенно отличается от Рыбинского. Поскольку оно состоит из речной и озерной частей, в каждой из них ведущая роль в перемещении и трансформации водных масс принадлежит различным факторам.

Речная часть. Большую часть этого участка занимает водная масса, поступающая из Рыбинского водохранилища, поэтому динамическое поведение ее определяется прежде всего режимом сбросных расходов Рыбинской ГЭС. От них зависит проточность рассматриваемого участка водоема и, следовательно, скорость и характер перемещения вод. Данные инструментальных измерений скоростей течения свидетельствуют о том, что в момент сброса воды Рыбинской ГЭС на большей части речного участка скорость течения близка к скорости реки в естественных условиях и река не уменьшится ее наблюдается лишь ниже Костромы. При общей тенденции уменьшения скорости течения в потоке по ходу воды она достаточно высока и как по поперечному сечению потока, так и по вертикали сохраняет основные закономерности речного потока.

Как указывали исследователи на Рыбинском водохранилище (Буторин и Лигинин, 1962, 1963), для выявления основных особенностей перемещения вод в нижних бьефах ГЭС необходимо учитывать характер работы этого расположенного гидросооружения и связанные с ним колебания уровня и уклона по всей поверхности. Так же как и на волжском участке Рыбинского водохранилища, в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС при сбросе каждой новой порции воды возникает волна попуска, быстро распространяющаяся по руслу Волги и вызывающая и тем подъем уровня и стоковое течение, скорость которого как по протяженности потока, так и в отдельных точках колеблется в широких пределах. С прекращением попуска уровень воды в нижнем бьефе повышается и стоковое течение затухает. Понижение уровня может быть настолько значительным, что иногда вызывает обратное перемещение подлой массы. О возможности такого перемещения вод в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС свидетельствуют обратные уклоны водной поверхности между соседними подмерными постами (табл. 103).

Ритмичность работы Рыбинской ГЭС по колебаниям уровня прослеживается до Костромы, следовательно, и пульсирующий режим перемещения водной массы охватывает весь указанный участок водохранилища.

Таблица 103

Уровень воды (см) в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС в дни отсутствия
выбросов в 1961 г.
(по К. К. Эдельштейну, 1965б)

Пункт	9 II	6 VIII	17 IX	21 IX	23 XI
г. Тутаев	408	407	427	432	421
г. Ярославль	410	412	430	429	428
Приращение уровня	-2	-5	-3	3	-7
г. Ярославль	410	412	430	429	428
г. Кострома	420	421	444	440	448
Приращение уровня	-10	-9	-14	-11	-20

Естественно, что пульсирующий характер перемещения вод в речной части водоема существует только при соответствующей ритмичности работы Рыбинской ГЭС и может искажаться половодьем и паводками на крупных притоках и изменением характера режима сбросных расходов. Эти особенности перемещения вод на речном участке Горьковского водохранилища были отмечены К. К. Эдельштейном и по электропроводности воды.

Распределение электропроводности с учетом режима работы ГЭС, уровней и уклонов водной поверхности подтверждает пульсационный характер перемещения водных масс в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС. Воды, сброшенные через Рыбинский гидроузел, перемещаются по руслу Волги отдельными объемами, своего рода «порциями» (Эдельштейн, 1965б). Такие «порции» сохраняют свои индивидуальные свойства в течение нескольких суток и могут продвигаться на значительное расстояние от Рыбинской ГЭС. Особенно четко они отмечаются в такие периоды, когда перед шлюзами и ГЭС Рыбинского гидроузла находятся различные водные массы.

Рассмотрим пример, приведенный в указанной работе К. К. Эдельштейна. В 10 час. 28 августа 1962 г. электропроводность воды в русле Волги у Рыбинского шлюза равнялась 178 мксим./см. Ниже устья Шексны она резко понижалась до 140 мксим./см, а выше сел. Константиновского — до 131 мксим./см. Воды с такой электропроводностью занимали все русло Волги до сел. Константиновского и стрелнинскую часть потока до г. Красный Холм. Ниже этого пункта электропроводность увеличивалась и у сел. Норского достигала 150 мксим./см. Между сел. Фрольцово и устьем Которосли она вновь понижалась до 133 мксим./см.

К. К. Эдельштейн считает, что повышение электропроводности воды на 15 мксим./см между селами Норским и Фрольцово не может быть связано со стоком притоков или сбросами сточных вод. Это доказывается им на основании соответствующего расчета по формуле смещения (Алмазов, 1956). По мнению Эдельштейна, происхождение этого «пятна» вод с повышенной электропроводностью связано с существенным изменением соотношения объемов вод, поступающих через ГЭС и через шлюзы. Так как в рассматриваемый период через шлюзы сбрасывались воды с электропроводностью 180 мксим./см, а через ГЭС — с электропроводностью 130 мксим./см, то повышенное поступление вод при шлюзовании и вызвало увеличение электропроводности сравнительно большого объема вод. Действительно, если в среднем за сутки расходы воды на шлюзование составляют менее 5%, то с 8 час. 26 августа до 4 час. 27 августа, когда ГЭС не работала, в нижний бьеф было сброшено через шлюзы 26% общего сброса гидроузла за этот период. Непостоянство соотношения объемов

у) эти данные зависят от времени и температуры, и в соответствии с этим на исследуемом участке появляется серия «пятен» вод с повышенной электропроводностью, которая указывает на пульсирующий характер перемещения вод в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС.

Помимо получения представления о характере процесса перемещения вод в нижнем бьефе гидроузла с помощью таких «пятен» можно приближенно определять среднюю скорость их перемещения. Так, на этом основании было установлено, что сброшенные через Рыбинскую ГЭС угром 27 августа воды, на следующий день к вечеру достигли сел. Норского, пройдя 80 км за 37 час (Эдельштейн, 1965б). Таким образом, средняя скорость перемещения их оказалась равной 2.2 км/час, или 0.6 м/сек., что вполне согласуется с данными инструментальных измерений.

Пульсирующий режим перемещения вод на речном участке водохранилища оказывает существенное влияние на характер втекания в водоем вод боковой приточности и на процессы смешения их с водами водохранилища. Это можно хорошо проследить на примере р. Которосли.

Различные варианты смешения водных масс Которосли и водохранилища рассмотрены К. К. Эдельштейном (1965б, 1968), который по распределению электропроводности сумел подметить весьма важный и интересный момент в перемещении вод Которосли. Оказывается, при минимальных сбросах Рыбинской ГЭС и большом стоке Которосли на спаде половодья воды последней, занимая все приустьевое пространство русла Волги, распространяются не только вниз по нему, но и вверх. Присутствие вод Которосли было обнаружено даже в районе сел. Фрольцоло. Возможность такого перемещения вод Которосли в сторону Рыбинской ГЭС вполне вероятна, так как при определенных условиях работы ГЭС на этом участке водохранилища могут существовать обратные уклоны водной поверхности (см. табл. 103). Поскольку всякая река, в том числе и Которосль, может быть потенциальным источником загрязнений, то выяснение особенностей перемещения ее вод может иметь принципиальное значение при решении вопросов водопользования.

Таким образом, особенности и скорость перемещения вод в речной части Горьковского водохранилища обуславливаются прежде всего режимом работы Рыбинской ГЭС.

Озерная часть. Процессы перемещения и трансформации водных масс в озерной части водохранилища заметно отличаются от речного участка. Это связано прежде всего с изменением скоростного режима. С приближением к озерной части водохранилища скорости течения постепенно уменьшаются и в районе городов Юрьевца и Чкаловска при отсутствии ледяного покрова скорость течения даже в русле Волги очень мала. Лишь с приближением к Горьковской ГЭС течение по бывшему руслу Волги заметно усиливается и в отдельных случаях скорость его достигает значительной величины (Буторин, 1963а). Естественно, что с уменьшением проточности уменьшается и скорость перемещения водных масс. Только в период весеннего наполнения водохранилища, когда наблюдается наибольшая проточность водоема, скорость перемещения вод в озерной части достигает в среднем 0.07–0.08 м/сек. (Эдельштейн, 1965а).

На отдельных участках озерной части водохранилища при определенных условиях скорость перемещения водных масс может значительно превышать среднюю величину. Увеличение ее особенно хорошо заметно при втекании речных вод в озерную часть водоема. Так, в двадцатых числах июля 1962 г. средняя скорость перемещения межениных вод Унжи при выходе в юрьевецкое расширение составляла около 0.17 м/сек. Такая высокая скорость перемещения вод в указанном районе объясняется двумя причинами: дождевым паводком в верховьях реки и ветром. В связи с дождевым паводком увеличивается расход воды, а следовательно, и

корость стокового течения по руслу Унжи Вегер вызывает ветровое течение. Так, в центре юрьевецкого расширения ветер северного и северо-восточного направлений со скоростью 4—5 м/сек. может вызвать ветровое течение со скоростью порядка 0.10—0.12 м/сек. Таким образом в отличие от речного участка в озерной части Горьковского водохранилища, как и Рыбинского, в перемещении водных масс определенное значение приобретает и ветровой фактор.

Следует подчеркнуть, что в приустьевых заливах средняя скорость перемещения вод притоков тесно связана с расходом воды в замыкающих створах. С увеличением расхода воды скорость перемещения возрастает и наоборот. В связи с этим воды ядра половодья или паводка движутся быстрее, чем воды начальной стадии, при этом ширина зоны смешения речных вод с водами водохранилища сокращается, а горизонтальные градиенты показателей водных масс в ней сильно возрастают. Так, скорость перемещения ядра паводка Немды в последней декаде июля 1962 г., рассчитанная К. К. Эдельштейном (1968) по изменению электропроводности, составляла около 0.01 м/сек., а скорость перемещения вод Немды в зоне смешения их с водами водохранилища была менее 0.007 м/сек.

Основные особенности перемещения водных масс, отмеченные в Горьковском водохранилище, сохраняются и на соответствующих участках Куйбышевского водохранилища, а перемещение вод в Волгоградском водохранилище имеет много общего с перемещением вод в Угличском водохранилище.

Таким образом, на примере Рыбинского и Горьковского водохранилищ удалось показать, что характер перемещения водных масс во внутренних водоемах находится в тесной зависимости от морфометрических особенностей, режима наполнения и сработки последних.

О факторах и механизме трансформации водных масс в водохранилищах

В зависимости от времени пребывания водной массы в определенном районе водохранилища и главным образом от перемещения из одного района в другой изменяются ее первоначальные свойства. Она становится более теплой или холодной, более цветной или менее цветной, более мутной или прозрачной, удельная электропроводность ее также не остается постоянной. Еще менее консервативным является газовый состав водных масс. Все это приводит к трансформации водной массы.

Термин «трансформация» в гидрологии употребляется весьма часто. Обычно под ним понимают любое изменение тех или иных характеристик водной массы. Поскольку это соответствует смысловому значению слова «трансформация», с этим термином придется согласиться, но условность его очевидна. Действительно, одним и тем же термином обозначается как незначительное изменение свойств водной массы, так и такое, в результате которого водная масса теряет свою индивидуальность. Следовательно, в частном случае трансформация водной массы представляет собой такой процесс изменения ее свойств, в результате которого образуется новая водная масса.

В ходе исследования волжских водохранилищ было обнаружено, что наиболее резкое изменение основных характеристик вод приурочено к районам соприкосновения различных водных масс. Так, по данным К. К. Эдельштейна (1965а), в зоне соприкосновения вод половодья Немды и Унжи с волжской водной массой в озерной части Горьковского водохранилища максимальный горизонтальный градиент электропроводности иногда достигает 160 мксим./см. Расчеты М. Г. Ершовой (1965) показали, что в Рыбинском водохранилище в зонах смешения различных вод гори-

фронтальные градиенты также весьма значительны. Такие зоны раздела водных масс, согласно терминологии В. К. Агеевского (1944), называются фронтальными. Именно в них и происходит наиболее интенсивная трансформация водных масс.

Подобные зоны трансформации в водохранилищах особенно отчетливо выражены весной, когда воды половодья и воды водохранилища резко различаются по своим характеристикам. Это хорошо видно на примере волжских и моложских вод в Рыбинском водохранилище, которые с выходом в открытую часть водоема как бы вклиниваются в воды его центральной части (Буторин, 1965б; Ерипова, 1965) и в зоне соприкосновения с последними трансформируются наиболее интенсивно.

Каков механизм этого явления? Поскольку водохранилища являются проточными водоемами, то естественно, что в них существуют стоковые течения. Почти для всех естественных потоков характерен турбулентный режим течений, особенностью которого является пульсация скоростей течения и связанный с ней постоянный взаимокompенсирующийся обмен объемами соседних областей жидкости, представляющий собой турбулентное перемешивание вод (Караушев, 1960).

Несмотря на то что абсолютная величина скорости течения в зоне соприкосновения различных вод обычно значительно меньше, чем в речном потоке, турбулентное перемешивание охватывает и эту зону. Однако, если в пределах одной и той же водной массы в результате турбулентного перемешивания происходит лишь некоторое выравнивание абсолютных значений ее характеристик, то в зоне соприкосновения вод с различными свойствами этот же процесс протекает по принципу смешения растворов и приводит к перемешиванию как минимум двух различных водных масс. Это в свою очередь, как правило, ведет к образованию новой водной массы с качественно иными характеристиками.

Интенсивность трансформации водных масс в зоне смешения различна и зависит прежде всего от скорости течения. Как показал К. К. Эдельштейн (1965а) на примере Горьковского водохранилища, скорость перемещения зон смешения колеблется в широких пределах. Так, скорость перемещения зоны смешения паводочных вод Унжи с волжской водной массой в конце июля 1962 г. составляла в среднем 5.2 см/сек. Наибольшей скоростью перемещения характеризовался центральный (лобовой) участок, а наименьшей — периферийные (боковые). В соответствии с этим и интенсивность трансформации вод на различных участках зоны смешения была различной: в центральной части вследствие повышенной скорости трансформация вод проходила значительно быстрее, чем на периферийных участках.

Таким образом, смешение двух или нескольких водных масс в зоне их соприкосновения является одной из основных сторон механизма трансформации. Этот процесс имеет сходство со смешением вод во фронтальных зонах океана (Ханайченко, 1947) и представляет собой фронтальную трансформацию водных масс. Как и турбулентное перемешивание вод в потоке, он обусловлен горизонтальной составляющей гидростатического давления. Учитывая генезис данного вида трансформации, мы имеем все основания условно назвать ее гидрогенной трансформацией водных масс. Эта форма трансформации в водохранилищах имеет особое значение, так как она приводит к образованию из речных вод водной массы озерного типа с присущими ей процессами накопления вещества и энергии (Россолимо, 1964).

Изменение свойств водных масс в водохранилищах происходит не только в результате гидрогенной трансформации, но и под воздействием метеорологических факторов, являющихся «внешними» по отношению к водным массам. Особенно большую роль в этом играют сила и направле-

ние ветра, составляющие радиационного баланса и температура воздуха. Так, ветровое воздействие на воды водохранилища вызывают ветровые течения, а также волнение и стонно-нагонные колебания вод. Даже при слабых и неустойчивых ветрах в озеровидных участках водохранилищ наблюдается значительная подвижность вод. Естественно, что при любом перемещении вод существуют скорости, а с пульсациями последних непосредственно связано турбулентное перемешивание. Интенсивность этого процесса характеризуется соответствующими коэффициентами обмена. По величине их можно судить об интенсивности перемешивания, а с помощью эллипсоида обмена можно получить представление о величине горизонтального турбулентного обмена в любом направлении. В процессе турбулентного обмена происходит постепенное изменение характеристик водных масс и в итоге их трансформация.

Таким образом, одним из факторов внешних сил, вызывающих трансформацию водных масс, является ветровая деятельность над водоемом. Механизм трансформации в данном случае имеет много общего с рассмотренным выше: изменение свойств водных масс происходит в результате турбулентного перемешивания. Следовательно, силы, вызывающие трансформацию, различны, а механизм ее и результаты одинаковы.

Трансформацию водных масс под воздействием внешних факторов, в данном случае ветра, также можно назвать фронтальной, так как она происходит в зоне раздела двух различных сред — воды и воздуха. Но в отличие от гидрогенной, которая наиболее четко проявляется в зонах соприкосновения различных вод и протекает в относительно узкой вертикальной или наклонной плоскости, трансформация вод под действием ветра наблюдается всюду, где действует ветер. Она возникает и протекает преимущественно в горизонтальной плоскости, постепенно захватывая всю толщу вод.

Из других метеорологических факторов существенную роль в трансформации вод водохранилищ играет радиационный баланс и температура воздуха. Радиационный баланс определяет тепловой эффект солнечной радиации на подстилающую поверхность. От него в значительной степени зависит распределение температуры в воде и в прилегающих к ней слоях воздуха, а следовательно, и характер теплообмена между водой и атмосферой. Процесс теплообмена между водой и воздухом заключается в получении некоторого количества тепла водой от воздуха, если температура последнего выше температуры воды или, наоборот, в отдаче тепла водой более холодному воздуху.

Исследуя теплообмен между морем и атмосферой, В. В. Шулейкин (1953) установил, что в случае положительного теплообмена, когда вода теплее воздуха, количество тепла, отдаваемого водой воздуху, прямо пропорционально разности температур этих сред и не зависит от скорости ветра. Такое положение В. В. Шулейкин объясняет следующим образом. По мере нагревания холодного воздуха от более теплой воды слой его, непосредственно прилегающий к воде, становятся более легкими и поднимаются вверх, вызывая конвекцию. В результате отдачи тепла воздуху поверхностные слои воды охлаждаются, становятся более тяжелыми и опускаются вниз, вызывая конвекцию в водной среде. Таким образом, как в воздухе, так и в воде возникает перемешивание, которое независимо от механического воздействия ветра поддерживает однородные условия охлаждения воды. Только при больших скоростях ветра конвекция не успевает выравнивать температуру поверхностного слоя воды и тогда на интенсивность теплообмена влияет ветер.

При отрицательном теплообмене, когда вода проигрывает от воздуха, ветер играет весьма активную роль. В этом случае верхний слой воды, получивший часть тепла от воздуха, и охладившийся нижний слой воздуха

на по равичной поверхности образуют «подушки» (Шулейкин, 1953), затрудняющие теплообмен. В таких «подушках» температуры воздуха и воды могут быть весьма близкими друг к другу, и лишь ветер, вызывая механическое перемешивание воздуха и воды, уничтожает «подушки» на поверхности раздела и способствует дальнейшему теплообмену. Таким образом, за счет поглощения солнечной радиации и теплообмена формируется термическое состояние водных масс водохранилищ, определяется скорость их прогрева и охлаждения. Механизм процессов, рассмотренный выше, указывает на то, что эти процессы изменяют не только температурную характеристику вод, но и их плотность. Изменение же плотности вызывает конвективное перемешивание вод, которое сопровождается изменением ряда других свойств водной массы.

Изменение свойств водных масс под воздействием метеорологических факторов является второй важной стороной механизма трансформации и представляет собой новую форму последней. Эту форму трансформации водных масс с учетом сил, ее обуславливающих, мы условно назвали метеогенной.

Гидрогенная и метеогенная трансформации водных масс в условиях водохранилищ часто происходят одновременно, но иногда могут проявляться и самостоятельно. Так, в Рыбинском водохранилище в период интенсивного наполнения его решающую роль в трансформации вод играет гидрогенная трансформация. Метеогенная трансформация в это время имеет меньшее значение. Во второй половине весны роль последней постепенно увеличивается, и к началу лета она приобретает решающее значение. Это хорошо подтверждается характером сезонного распределения водных масс в водоеме (Буторин, 1966а).

В общих чертах распределение водных масс в Рыбинском водохранилище в начале мая следующее: в центре располагаются высокоминерализованные зимние воды, а прибрежные районы и эстуарии затопленных рек заполнены слабоминерализованными водами речного половодья и склонового стока. В это время в водоеме наблюдаются весьма интенсивные стоковые течения (Буторин и Литвинов, 1963б), пульсации скоростей которых, вызывая турбулентный обмен, выравнивают характеристики вод внутри речных потоков и приводят к резким изменениям их в зонах смешения. Это указывает на то, что наиболее интенсивная трансформация вод в данное время происходит именно в зонах смешения, а поскольку последние занимают обширные акватории, то решающая роль гидрогенной трансформации водных масс ранней весной вполне очевидна.

К концу весеннего наполнения водохранилища стоковые течения постепенно ослабевают. С уменьшением скорости перемещения вод интенсивность турбулентного перемешивания падает, а время пребывания их под воздействием одних и тех же метеорологических условий увеличивается. В связи с этим роль метеорологических условий в трансформации водных масс возрастает, особенно в период интенсивного увеличения солнечной радиации и ветровой деятельности. В это время западно-восточный перенос воздушных масс ослабевает и преобладающим становится меридиональный. Усиление меридиональной циркуляции весной проявляется в увеличении повторяемости ветров северной составляющей, особенно в конце мая.

Даже при слабых и неустойчивых ветрах роль их в трансформации водных масс заметна четко. Это хорошо показано К. К. Эдельштейном (1968) при изучении динамики зоны смешения водных масс на моложском участке Рыбинского водохранилища. В этом районе весной четко выделяется зона соприкосновения различных вод. При штилевой погоде наиболее резкое изменение характеристик вод происходит именно в этой зоне и указывает на наличие гидрогенной трансформации. С усилением

воздействия ветра на водную поверхность зона смешения изменяет свое положение, она значительно расширяется, появляется асимметрия, неравномерность распределения горизонтальных градиентов характеристик на отдельных участках увеличивается. В результате усиливается горизонтальный обмен и, как следствие его, интенсивность перемешивания вод. В данном случае происходит наложение метеогенной трансформации на гидрогенную, что и вызывает повышение общей интенсивности перемешивания вод.

С усилением трансформации расположение водных масс в водоеме заметно меняется. К началу июня акватория, занимаемая речными водами, увеличивается, а площадь водной массы водохранилища сильно сокращается. Ядро последней остается примерно на том же месте, что и в мае, но оказывается сильно размытым.

В летний период метеорологические условия бассейна водохранилища формируются на фоне трансформации воздушных масс в антициклонах и на фоне циклонической деятельности и характеризуются повышением температуры воздуха, неустойчивыми ветрами западного и северо-западного направлений. В этом сезоне иногда наблюдаются ветры шквального характера, обычно сопровождающиеся грозами или предшествующие им. Усиление ветра и прогрева вод приводит к дальнейшему увеличению роли метеогенной трансформации. В летний период на большей части акватории эта форма трансформации становится преобладающей. В результате ее как речные воды, занимающие в начале сезона обширные районы водохранилища, так и воды центральной части быстро меняют свои характеристики, и к концу лета вся центральная часть водоема и прилегающие к ней участки заполняются относительно однородной водной массой. Речные воды в чистом виде встречаются лишь в верхних участках соответствующих плесов и составляют незначительную часть общего объема. В зоне соприкосновения их с водами водохранилища гидрогенная трансформация сохраняется, но роль ее в этом сезоне по сравнению с метеогенной очень мала.

Преобладающая роль метеогенной трансформации сохраняется и осенью, когда понижение температуры воздуха сопровождается усилением циклонической деятельности и западно-восточного переноса воздушных масс, который приводит к устойчивым по продолжительности и направлению ветрам повышенной скорости. Картина меняется лишь после ледостава, когда роль метеогенной трансформации резко уменьшается и снова начинает преобладать гидрогенная трансформация.

Одновременно с рассмотренными формами трансформации водных масс существенное влияние на изменение характеристик вод в водохранилищах оказывают биологические факторы. Видовой состав и численность растений и животных является своего рода функцией водоема и его режима и иногда даже используется в качестве биологического показателя водных масс. Многочисленными исследованиями показано, что среди биологических факторов наиболее существенное влияние на изменение физико-химических характеристик водной среды оказывают развитие фитопланктона и бактериальные процессы.

Фитопланктон является одним из основных источников органического вещества в водоеме, а микрофлора осуществляет процессы распада последнего и заканчивает круговорот биогенных элементов, всевозможные окислительно-восстановительные превращения и другие процессы, которые ведут к формированию определенного состава водной среды и донных отложений (Кузнецов, 1952; Сорокин, 1958).

Как показали исследования А. П. Щербакова (1953), даже в небольших водоемах с относительно длинной береговой линией первичная продукция фотосинтеза фитопланктона является главным источником органического

с 1991 по 1993 гг. в соответствии с указом Президента Российской Федерации от 14.02.1993 № 1400-УЗ «О мерах по совершенствованию государственного управления» в состав Правительства Российской Федерации были включены 14 федеральных органов исполнительной власти, в том числе 11 министерств, 2 государственных комитетов и 1 государственное агентство. В настоящее время в состав Правительства Российской Федерации входят 26 федеральных органов исполнительной власти, в том числе 19 министерств, 4 государственных комитета и 3 государственных агентства.

Финансовый рынок — это место, где происходит обмен деньгами и ценными бумагами. Он играет важную роль в экономике, обеспечивая финансирование предприятий и государства. Рынок состоит из множества участников, включая банки, страховые компании, пенсионные фонды и частных инвесторов. Основные функции финансового рынка — это аккумуляция сбережений, перераспределение капитала и обеспечение ликвидности. Важным элементом рынка являются различные инструменты, такие как акции, облигации, деривативы и валюты. Развитие финансового рынка способствует экономическому росту и стабильности.

В основном от фитопланктона роль бактерий сводится к разложению органического вещества. В том процессе образования органического вещества и поглощения минеральных и неорганических солей, который в среднем в океане идет, то разложение его происходит постоянно по всей толще воды и во всех ее частях. И тогда то же, как правило происходит и в океане и в водоемах, часть того, что создано органическим веществом (1) (2) и 80% органического вещества, образуются и в водоемах и в океане разлагается в основном по той же массе, по тем же условиям и на тех же этапах.

Обобщенные представления о роли микроорганизмов в развитии патологических процессов в организме человека и животных. В этой работе особое внимание уделяется роли микроорганизмов в развитии заболеваний, связанных с нарушением обмена веществ и с заболеваниями органов дыхания. Также рассматриваются вопросы профилактики заболеваний, вызванных микроорганизмами, и вопросы лечения заболеваний, вызванных микроорганизмами.

[illegible]

Откуда следует, что и монотонно разга функцио химическ их характеристик под и сохранени их и ич естной с ч ении у яны аотм с биохимическо й а н и етс ко ф ит ц л и н к т и а и м и к р о о р г а н и з м а . Н о с л о н з а х а р а к т е р и с т и к и с р е з а ч т б и з о г ч е с к и й ф и т о р о к а с н а е т н е к о т о р о е в т а м н е п а т р а н с - ф о р м и р о в а н и е .

1. К тем же результатам в ряде исследований по охране здоровья населения в условиях чрезвычайных ситуаций приводит анализ данных о состоянии здоровья населения в условиях чрезвычайных ситуаций. В частности, в ряде исследований отмечается, что в условиях чрезвычайных ситуаций наблюдается увеличение заболеваемости и смертности населения, что связано с воздействием различных факторов, таких как загрязнение окружающей среды, нарушение санитарно-гигиенических условий, психологическое напряжение и др. Эти данные подтверждают необходимость разработки и внедрения эффективных мер по охране здоровья населения в условиях чрезвычайных ситуаций.

бо не четко проявляется при взаимном соприкосновении различных вод. В этих югах она имеет характер смешения растворов и протекает в отношении узкой нормальное или паллоной плоскости. Метеогенная трансформация охватывает обычно обширные пространства водоема, и юны и юны смешения, и протекает преимущественно в горизонтальной плоскости, распространяясь постепенно от поверхности на глубину. Оба формы трансформации пабоются, как правило, одновременно и при метеонононии подохранилищ Волги охватывают всю водную толщу. На трансформацию поных масс в водохранилищах заметное влияние оказывают также биологические процессы (Буторин, 1968а, 1968б).

Роль перемешивания в трансформации водных масс в водохранилищах

Выраженности физических и химических характеристик водных масс происходит в результате перемешивания вод. идет перемешивания количественно движения, тепла, растворенных солей и водных взвесей как от слоя к слою так и в горизонтальном направлении. Следовательно, процесс перемешивания вод в водохранилищах позволяет нам лучше понять особенности формирования и трансформации водных масс в водоеме.

Из литературных источников известно, что перемешивание вод происходит как при ламинарном, так и при турбулентном движении жидкости. Однако турбулентное перемешивание протекает значительно быстрее, чем перемешивание, обусловленное молекулярной диффузией. Так, турбулентная диффузия и теплопроводность могут по своей интенсивности превосходить в тысячи и сотни тысяч раз молекулярную диффузию и теплопроводность (Караушев, 1960). Следовательно, основную роль в формировании и трансформации водных масс в водоеме играет турбулентное перемешивание.

Существует ряд теорий турбулентного перемешивания. Кроме того, при решении конкретных задач теории турбулентности иногда привлекают юные математические гипотезы, опирающиеся на качественные физические аналогии и соображения (Гимфеев и Панов, 1962). В отношении речных потоков широкое распространение получила диффузионная теория турбулентности (Маккавеев, 1931, 1952, Маккавеев и Конопалов 1940; Караушев, 1946, 1947, 1948, 1960).

Возникновение турбулентного перемешивания элементарно можно представить таким образом. Над спокойной поверхностью водоема в какой-то начальный момент времени возникает ветер, с которого постепенно нарастает. При этом на поверхности водоема сначала появляются капиллярные волны, преобразующиеся постепенно в ветровые. После того как ветер достигает значительной силы начинается опрокидывание гребней волн и их разрушение, а также образование вихрей проникающих на большую и меньшую глубину и перемешивающих их и еще всего юные стратифицированные слои. Эти вихри в потоке образуются непрерывно развиваются и затем разрушаются освобождая объем воды участия образования новых вихрей. Внутри перемешивания наиболее крупных вихрей образуются действующие вторичные внутри торных вихреобразование следующего порядка и т.д.

Одно из основных в теории перемешивания ветра о водную поверхность и движение ветра на наветренную сторону водоема возмущает ровное течение. На поверхности раздела между слоем воды охваченным ветровым течением и нижележащим спокойным слоем происходит аналогичное явление, что и на поверхности раздела вода-воздух. Юко в данном случае роль ветра играет юный слой воды и поэтому юное разделение

и нужен а именно меньший градиент скорости, чем между возду-
х и водой (Зубов, 1958)

В некоторых случаях перемешивание является наиболее мощным и
механизмом определяющим интенсивность турбулентного перемешива-
ния. Оно характеризуется соотношениями с соответствующими коэффициентами обмена.
Планирование эксперимента обмена можно составить при составлении об-
текта и турбулентного перемешивания в определенном направлении
а также их объем направляет наглядное представление эл-
ластичности. Построение эллипсоидов турбулентного обмена с использо-
ванием мер при рассмотрении изложено в работе В. Т. Тимофеева
и В. В. Павлова (1960). Схему вычисления коэффициентов турбулентного
обмена в характерных положениях в основе наших расчетов.

Методы многослойных наблюдений над течениями, полученные
на различных участках Рыбинского водохранилища с помощью самопи-
сущего Ю. К. Алексеева (Буторин и Литвинов 1962, 1963а, 1963б)
позволяют применять отмеченным методом характеристики горизон-
тального турбулентного обмена для данного водоема.

Особенности вычисления коэффициента горизонтального турбулентного
перемешивания зависят от периода осреднения пульсации скорости тече-
ния (Гендешин 1959, 1961; Латуна, 1960). В большинстве наших наблю-
дений интервал отпечатка элементов течения составлял 5 мин., что позво-
лило проанализировать осреднение пульсации скорости за промежуток времени
с интервалом 5 мин. По исследованиям В. С. Латуны (1960), при расчете
коэффициента горизонтального обмена в зоне устойчивого течения ис-
пользование пульсации скорости течения, осредненных за любой период
значительного промежутка времени с интервалами от 5 до 60 мин., приво-
дит к близким результатам.

Несмотря на то что перенос масс в Рыбинском водохранилище
большинством случаев не представляет собой устойчивого течения, рас-
четы коэффициента горизонтального турбулентного обмена в нем по пуль-
сациям соответствующих скорости течения, осредненным за 20 и 60 мин.,
дали близкие результаты. Учитывая это, мы при вычислении коэффициента
обмена по отпечаткам интервалов отпечатков элементов течения, равным
1 час, а пульсации составляющих скорости течения определяли относи-
тельно средней суточной скорости. Схема вычисления коэффициентов
горизонтального турбулентного обмена и пример расчета их для одного
из танков Рыбинского водохранилища представлены в табл. 104.

Как видно из приведенной схемы, при вычислении коэффициентов
обмена в наблюдающих скорости течения раскладываются на составляю-
щие по меридиану и по параллели определяются осредненные за опре-
деленный промежуток времени величины этих составляющих а затем вы-
числяются пульсации скорости. Дальнейшие расчеты идут по схеме.

Из табл. 104 видно, что пульсации скорости течения группируются как
по большим так и по малым интервалам времени. Это наблюдалось и
при дальнейших расчетах. Значит, зарегистрированные нами скорости
течения можно рассматривать как случайные величины в скоростном поле
определенного района водохранилища. Следовательно, и в этих водоемах,
а и в других морях (Штокман 1940), турбулентное перемешива-
ние является беспорядочным движением турбулентных вихрей и пульса-
ционные колебания соответствующих скоростей течения от их средних значе-
ний лишь подчиняются закону нормального распределения случайных
величин (Виликанов 1949; Штокман, 1940; Озмидов, 1957, 1959).

Результаты расчетов коэффициентов горизонтального турбулентного
обмена для различных участков Рыбинского водохранилища даны
в табл. 105 и 106. В этих таблицах приведены коэффициенты обмена вдоль
меридиана $A_m \cdot 10^6$ и параллели $A_p \cdot 10^6$, $A_{\phi} \cdot 10^6$ и $A \cdot 10^6$ в г см·сек.,

Схема вычисления коэффициента горизонтального турбулентного обмена в Ыбинеком водохранилище. Ст. № 6,
горизонт наблюдения 1.8 м 13 VIII 1964

Время час	Элементы течения		Составляющие		Откло- нения от средне- суточ- ных, и	$\sum_1^n u$	n	$\frac{(\sum_1^n u')}{n_p}$	$\sum_1^n u_\lambda$	$\frac{\sum_1^n u' \sum_1^n u'_\lambda}{n_p}$	Откло- нения от средне- суточ- ных, u_λ	$\sum_1^n u'_\lambda$	n_λ	$\left(\sum_1^n u'_\lambda\right)$ n_λ	$\sum_1^n u$	$\sum_1^n \sum_1^n u$
	напря- вле- ния, град	ско- ро- сть см/сек	меридиан, уф	парал- лель, у λ												
0	160	25	24 1	6 5	6 2						4 3				21 1	40.1
1	172	25	24 8	3 3	6 9						1.3			10		
2	173	26	23 9	2 3	8 0						+0.1					
3	180	24	24 0	0 0	6 1						2 2		1	4 8	6 1	13.2
4	167	24	23 4	5 4	5 5						3 2		3	23.0	16 7	16.2
5	161	24	23 2	6 2	5 3			289.4	11 9	64 0	4 0					
6	172	24	23 8	3 3	5 4						1 1					
7	172	24	23 9	2 1	6 0						0.1		1	0.01	6 0	0 6
8	172	21	20 8	2 9	2 9						0.7		1	0 5	2 9	2 0
9	173	19	18 9	1 7	2 0						0 3		2	0.	1 0	0 6
10	173	16	15 9	1 4	2 0						0 8					
11	172	18	17	2 3	0 1						0.3		1	0 09	0 1	0 03
12	173	16	15 9	1 4	2 0						0 8		1	0 61	0 0	1 0
13	170	11	15	3	3 1						+0.1		1	0 01	0 3	0 3
14	170	11	10 8	1 9	7 1			131 3	10 5	10 8	0 3					
15	177	11	1 0	0 8	2 9						1 4					
16	180	15	15 0	0 0	3 9						2 2					
17	172	12	11 9	1 7	6 0						0 3					
18	180	12	1 0	0 0	3 9						0 3					
19	1 2	13	13 0	0 3	4 9				1 3		2 7					
20	177	18	18 0	0 9	0 1			0 01		+0.1	1 3				43 6	51 0

Т а б л и ц а 104 (продолжение)

Время, час.	Элементы точения		Составляющие		Откло- нения от средне- сущес- твен- ных, u_{φ}	$\sum_1^n u_{\varphi}$	n_{φ}	$\frac{(\sum_1^n u'_{\varphi})}{n_{\varphi}}$	$\sum_1^{n_{\varphi}} u'_{\lambda}$	$\frac{\sum_1^n u_{\varphi} \sum_1^{n_{\varphi}} u'_{\lambda}}{n_{\varphi}}$	Откло- нения от сре- дних, u	$\sum_1^n u'_{\lambda}$	n_{λ}	$\frac{(\sum_1^n u_{\lambda})^2}{n_{\lambda}}$	$\sum_1^{n_{\lambda}} u'_{\varphi}$	$\frac{\sum_1^n u_{\lambda} \sum_1^{n_{\lambda}} u'_{\varphi}}{n_{\lambda}}$
	напра- вле- ние, град.	ско- рость, см сек.	меридиан. u_{φ}	парал- лель, u_{λ}												
21	172	14	-13.9	1.9	4.0 } 4.0 } 6.0 }	14.0	3	65.3	-1.1	-5.1	0.3 -0.3 0.5	11.7	10	13.7	43.6	-51.0
22	172	14	-13.9	+1.9												
23	172	12	-11.9	1.7												
Σ Средняя		-4.0.6	51.8	-	-	-	-	506.0	-	- 109.8	-	-	-	54.3	-	127.2
		17.9	+2.2													

$t = 1 \text{ час} - 3600 \text{ сек}; 2N_{\varphi} = 4; 2N_{\lambda} = 10.$

Уравнение эллипса обмена:

$0.455 \cdot 10^6 x^2 - 0.145 \cdot 10^6 xy + 0.020 \cdot 10^6 y^2 - 1 = 0; \quad \operatorname{tg} 2\alpha = \frac{-0.145}{0.455 - 0.020} = 0.33 \text{ (3)}; \quad \alpha \sim 171^{\circ};$

$A^2 = 0.475A + 0.039 = 0; \quad A_1 = 0.466, \quad A_2 = 0.008.$

Уравнение эллипса обмена в канонической форме:

$$\frac{x'^2}{\frac{1}{0.466 \cdot 10^6}} + \frac{y'^2}{\frac{1}{0.008 \cdot 10^6}} = 1.$$

Гaussи эллипса обмена:

$a_x = \sqrt{\frac{1}{0.466 \cdot 10^6}} = 1.46 \cdot 10^{-3}; \quad b_y = \sqrt{\frac{1}{0.008 \cdot 10^6}} = 0.06 \cdot 10^{-3}.$

$A_0 = 0.455 \cdot 10^6,$
 $A_{\lambda} = 0.020 \cdot 10^6,$
 $A_{\varphi\lambda} = 0.099 \cdot 10^6,$
 $A_{\lambda\varphi} = 0.046 \cdot 10^6,$
 $A_{\varphi\lambda\lambda\varphi} = -0.072 \cdot 10^6.$

а также угол α поворота оси (по часовой стрелке) от параллели коэффициенты обмена $A_{x'} \cdot 10^6$ вдоль малой оси $a_{x'}$ и $A_{y'} \cdot 10^6$ вдоль большой оси $b_{y'}$ горизонтального эллипса обмена.

В табл. 105 представлены данные расчетов коэффициентов обмена для периода с 11 по 18 августа 1964 г. по показаниям ст. № 1, расположенной в южной части водохранилища у банки Лысая Гора (рис. 132).

Таблица 105

Элементы эллипсов горизонтального турбулентного обмена
(в г/см·сек.) на ст. № 1 в Рыбинском водохранилище в 1964 г.,
вычисленные для района Лысой Горы

Дата	$A_{\varphi} \cdot 10^6$	$A_{\lambda} \cdot 10^6$	$A_{\varphi\lambda} \cdot 10^6$	$A_{\varphi'} \cdot 10^6$	$A_{\lambda'} \cdot 10^6$	α , град.	$A_{x'} \cdot 10^6$	$A_{y'} \cdot 10^6$	$a_{x'} \cdot 10^{-3}$	$b_{y'} \cdot 10^{-3}$
11 VIII	0.039	0.016	0.003	0.002	0.002	186	0.040	0.016	5.0	7.9
12 VIII	1.920	0.113	—0.489	—0.315	—0.402	168	2.000	0.028	0.7	6.0
13 VIII	0.455	0.020	—0.099	—0.046	—0.072	171	0.466	0.008	1.5	10.6
14 VIII	0.082	0.013	—0.012	—0.009	—0.010	172	0.084	0.012	3.5	9.1
15 VIII	0.102	0.018	—0.022	—0.042	—0.032	178	0.113	0.007	3.0	12.0
16 VIII	0.089	0.002	0.004	0.007	0.005	184	0.069	0.031	3.7	5.7
17 VIII	0.040	0.049	0.018	0.029	0.023	140	0.069	0.020	3.8	7.0
18 VIII	0.010	0.194	0.009	0.052	0.031	171	0.199	0.005	2.2	14.6

На этой станции регистрация элементов течения велась непрерывно с 7 августа по 23 сентября 1964 г. Самописец БПВ-2-р был установлен на горизонте 1.8 м при общей глубине станции 2.3 м. Из табл. 105 видно, что коэффициенты обмена в этом районе водоема, вычисленные за каждый день, существенно меняются.

Меняются они и на различных участках водохранилища (см. табл. 106). Ряд многосуточных наблюдений над течениями, выполненных самописцами БПВ-2-р летом 1964 и 1965 гг., позволил вычислить элементы эллипсов горизонтального турбулентного обмена для отдельных районов водоема (рис. 133). Полученная схема расположения эллипсов турбулентного обмена в горизонтальной плоскости хорошо согласуется с нашими представлениями о ветровых течениях в этом водоеме (Литвинов, 1966).

Оказалось, что в Рыбинском водохранилище наиболее сильное турбулентное перемешивание в горизонтальном направлении приурочено к районам с большой проточностью. Особенно велико оно на выходе основных речных потоков в открытую часть водоема.

На некоторых станциях направление наиболее интенсивного турбулентного обмена на первый взгляд кажется мало понятным. Так, на ст. 1 максимальный турбулентный обмен в горизонтальной плоскости направлен против обычного движения вод в сторону Рыбинской ГЭС. Но это

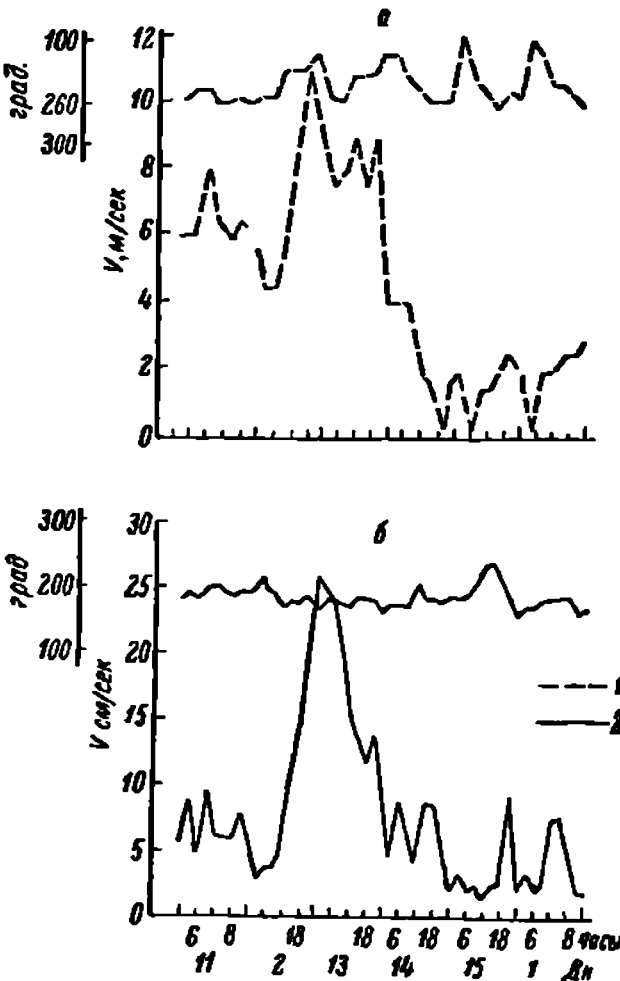


Рис. 132. Скорость (а) и направление (б) ветра и течения на ст. 1.
1 — скорость и направление ветра; 2 — скорость и направление течения.

оя е ьс о легко объясняется метеорологическими условиями в период н б ю енш

Анализ метеорологических условий показал, что в августе и сентябре 1964 г. в мелководном районе у банки Лысая Гора существовало ветровое течение и как элементы течения, так и турбулентность обуславливались таким изменчивым фактором, как ветер. В Рыбинском водохранилище вблизи берегов и на мелководьях у подветренного берега течение во всей водной толще даже при слабых ветрах было направлено по ветру (Литвинов, 1966). Это явление наблюдалось и в данном случае. При относительно устойчивом северном ветре прослеживалось соответствующее ему перемещение водных масс. Направление течения полностью совпадало с направлением ветра, а скорость его менялась в зависимости от скорости последнего. Аналогичной причиной было вызвано и направление наиболее интенсивного турбулентного обмена на ст. 4 и 4а (см. рис. 132).

Синхронные измерения течений на этих двух станциях показали, что, несмотря на близкое расстояние между ними (порядка 1 км), коэффициенты турбулентного обмена на них сильно различаются (табл. 107). Это указывает на то, что размеры вихревых образований, обуславливающие пульсации скорости в горизонтальном направлении в Рыбинском водохранилище, небольшие.

Естественно, что турбулентные вихри наибольших размеров образуются в горизонтальной плоскости вдоль по течению, поэтому и турбулентный обмен в этом направлении должен быть наиболее интенсивным. Иными словами, в тех районах водохранилища, где скорости течения выше, турбулентное перемешивание сильнее. Это хорошо прослеживается на примере потока в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС, где при скоростях течения до 0.70 м/сек., значения A_{ϕ} достигали 10.07×10^6 г/см·сек.

Вычисленные нами значения коэффициентов горизонтального турбулентного обмена для Рыбинского водохранилища по порядку величин мало отличаются от коэффициентов макрообмена в мелководных морях. Так, в Рыбинском водохранилище A_{ϕ} в поверхностном 5-метровом слое изменяется от $0.14 \cdot 10^6$ до $1.92 \cdot 10^6$ г/см·сек., а по данным В. Б. Штокмана (1940), та же величина в Каспийском море на глубине 5 м составляет $4.9 \cdot 10^6$ г/см·сек. Примерно такие же величины приводятся В. Т. Тимофеевым и В. В. Пановым (1962) для Карского моря, где на горизонте 10 м величина A_{ϕ} колеблется в пределах от $0.6 \cdot 10^6$ до $7.8 \cdot 10^6$ г/см·сек.

При изучении перемешивания значительный интерес представляет коэффициент вертикального турбулентного обмена, для вычисления которого обычно применяются косвенные методы. Один из них предложен С. В. Доброклонским (1947). Считая, что характер турбулентных процессов в поверхностном слое моря обуславливается ветровым волнением, этот автор предложил определять коэффициент вертикального турбулентного обмена (A_{τ}) по следующей формуле:

$$A_{\tau} = \frac{\pi \lambda^2 \rho}{18} \cdot \frac{h^2}{\tau} l - \frac{4\tau z}{l} - P \frac{h^2}{\tau},$$

где P — безразмерный коэффициент, равный по вычислениям С. В. Доброклонского $2.8 \cdot 10^{-2}$;

h — высота волны;

τ — период волны.

Из этой формулы видно, что коэффициент турбулентного обмена, вызванного ветровым волнением, пропорционален квадрату высоты волны и обратно пропорционален периоду волны. Используя данную формулу, мы определили A_{τ} для центральной части Рыбинского водохранилища.

Элементы эллипсов горизонтального турбулентного обмена (в г/см·сек.) на отдельных участках Рыбинского водохранилища

Дата	Номер станции	Горизонт, м	$A_{\varphi} \cdot 10^6$	$A \cdot 10^6$	$A_{\varphi\lambda} \cdot 10^6$	$A_{\lambda\varphi} \cdot 10^6$	$A_{\varphi} \cdot \varphi \cdot 10^6$	α , град.	$A_x \cdot 10^6$	$A_y \cdot 1$	$\alpha_x \cdot 1$	$b_y \cdot 1$
1964												
12 VIII	1		1.920	0.113	—0.489	—0.315	—0.402	168	2.000	0.028	0.7	6.0
26 VI	2	2.0	0.708	0.281	—0.385	—0.325	—0.355	151	0.910	0.080	1.1	3.6
29 X	3	3.5	1.140	0.320	—0.280	—0.160	—0.220	166	1.180	0.280	0.9	1.9
1965												
30 VI	4	4.5	0.240	0.810	—0.110	—0.270	—0.190	197	0.870	0.170	1.1	2.4
28—27 VI	5	4.0	0.140	0.410	—0.040	—0.070	0.050	349	0.430	0.120	1.5	2.9
25—26 VI	6	5.0	1.000	0.730	0.670	0.510	0.590	218	1.470	0.260	0.8	2.0

Элементы эллипсов горизонтального турбулентного обмена (в г см · сек.) на ст. 4 и 4а в Рыбинском водохранилище в 1965 г.

Дата	Номер станции	Горизонт, м	$A_{\varphi} \cdot 10^6$	$A_{\lambda} \cdot 10^6$	$A_{\varphi\lambda} \cdot 10^6$	$A_{\lambda\varphi} \cdot 10^6$	$A_{\varphi\lambda} = \lambda\varphi \cdot 10$	α , град.	$A_x \cdot 10^6$	$A_y \cdot 10^6$	$\alpha_x \cdot 10$	$b_y \cdot 10$
30 VI	4	4.5	0.240	0.810	0.110	0.270	—0.190	197	0.870	0.170	1.1	2.4
30 VI	4а	2.5	0.025	0.220	—0.050	—0.078	—0.064	196	0.239	0.005	2.0	14.1

Таблица 108

Изменение коэффициента вертикального турбулентного обмена
(A , в г см · сек.) с глубиной

Г р и н , м	С р ть ветра, м сек.			
		10	15	20
0	34.9	99.3	165.2	259.5
1	4.5	49.9	93.8	168.2
2	0.7	23.9	51.8	108.0
3	0.06	11.8	29.1	67.5
4	0.0	6.0	15.5	42.6
5	0.0	2.6	8.5	25.8
6	0.0	1.4	4.2	14.3
7	0.0	0.5	2.1	7.5
8	0.0	0.2	0.7	3.1
9	0.0	0.03	0.2	0.8

По данным Рыбинской гидрометеорологической обсерватории, при скорости ветра 5 м сек. высота волны в районе бывшего сел. Наволок равна 0.5 м, длина ее 6.2 м, а период 2 сек. Для такой волны величина A на поверхности составляет 34.9 г см · сек. (табл. 108). С увеличением силы



Рис. 133. Эллипсы горизонтального турбулентного обмена в Рыбинском водохранилище.

Цифры — номера станций.

ветра увеличивается и значение A . Так, в этом же районе при скорости ветра 10 м сек. высота волны уже 1.1 м, длина ее достигает 18 м, а период разилется 3.4 сек. При таких элементах волны A на поверхности составляет 99.3 г см · сек. Это указывает на существенное изменение коэффициента турбулентности в зависимости от скорости ветра. В море затула

ные волны с глубиной происходит по экспоненциальному закону и определяется по формуле

$$h_z = h_0 \cdot e^{-\frac{2\pi z}{\lambda}}.$$

Принимая во внимание мелководность водохранилищ, высоту волны на отдельных горизонтах рассчитывали по формуле, в которой учитывается общая глубина водоема

$$\frac{h_0 \cos h 2\pi \frac{H-Z}{L}}{\sin h 2\pi \frac{H}{L}},$$

где h_0 — высота волны на поверхности;

H — общая глубина;

Z — горизонт наблюдений;

L — длина волны.

Сопоставление результатов вычисления высот волн для одних и тех же горизонтов по указанным формулам показало, что различие их весьма незначительно и относится лишь к придонным горизонтам.

Из табл. 108 видно, что с глубиной коэффициент турбулентного обмена быстро убывает. Так, при скорости ветра 5 м/сек. уже на глубине 2 м волновое перемешивание практически отсутствует, а при скорости ветра 10 м/сек. оно охватывает значительную толщу вод водоема и достигает глубины 6 м. С увеличением скорости ветра перемешивание распространяется до дна (рис. 134).

По данным Н. А. Зиминской (1963), повторяемость скоростей ветра порядка 6–10 м/сек. по метеостанции ПОМ за навигационный период 1956–1961 гг. колебалась от 41% в июне до 56% в октябре. Следовательно, глубоководная часть водохранилища при отсутствии ледяного покрова подвержена частому и интенсивному волновому перемешиванию, которым охватывается практически вся водная толща.

Таким образом, в Рыбинском водохранилище наблюдается значительное турбулентное перемешивание вод, при котором происходит постоянный взаимокомпенсирующий обмен между соседними водными массами. Естественно, что такое перемешивание оказывает большое влияние на трансформацию существующих и формирование новых водных масс.

Особенно заметное турбулентное перемешивание наблюдается в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС. При исследовании режима потока в нижнем бьефе Рыбинской ГЭС оказалось, что даже при постоянных расходах ее и относительной стабильности потока в различных его точках наблюдались значительные изменения скоростей течения, указывающие на турбулентность потока. В данном случае коэффициенты турбулентного обмена вычислялись по формуле, приведенной в работе А. В. Караушева (1960). Значения их по створу колебались от 0.0002 до 0.0074 т·сек. м³ (Буторин и др., 1966). В нижнем бьефе Рыбинской ГЭС, как и в самом водо-

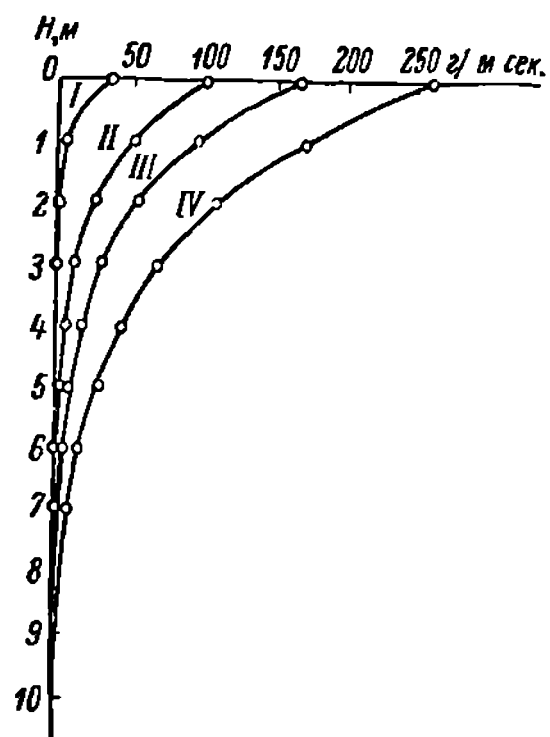


Рис. 134. Изменение коэффициента вертикального турбулентного обмена с глубиной.

I — скорость ветра 5 м/сек., h 0.5 м
II — скорость ветра 10 м/сек., h 1.1 м
III — скорость ветра 15 м/сек., h 1.5 м
IV — скорость ветра 20 м/сек., h 2.0 м.

хранилище, изменение коэффициентов турбулентного обмена с глубиной имеет одинаковый характер: максимальные значения отмечаются на поверхности, минимальные — у дна.

В отдельных случаях изменение свойств водных масс в водохранилищах может обуславливаться конвективным перемешиванием вод, но роль его по сравнению с турбулентным перемешиванием очень мала. Интенсивность трансформации вод при конвективном перемешивании характеризуется величиной вертикальной скорости движения вод. Для водохранилищ эта величина нам неизвестна, но данные о вертикальной скорости движения вод в озерах соответствующих климатических зон в литературе имеются. Так, в оз. Мендота, по расчетам Брисона и Суоми (Bryson, Suomi, 1952), она колеблется от 2 до $4 \cdot 10^{-1}$ см/сек. Ликенс и Рагоцкий (Likens, Ragotzkie, 1965) в небольшом озере под ледяным покровом определили ее в пределах 10^{-2} — 10^{-3} см/сек., а Рагоцкий и Братник (Ragotzkie and Bratnick, 1965) в оз. Верхнем нашли равной $4.5 \cdot 10^{-3}$ см/сек. Вполне вероятно, что и для водохранилищ эта величина будет близка к значениям, вычисленным для озер.

Таким образом, из рассмотренных примеров видно, что роль перемешивания в гидрологических процессах и, в частности, в трансформации водных масс водохранилищ весьма велика. Расчет коэффициентов турбулентного обмена в Рыбинском водохранилище показал, что перемешивание вод в нем происходит преимущественно за счет горизонтального турбулентного обмена, интенсивность которого значительно превосходит как вертикальную составляющую, так и другие формы перемешивания.

Трансформация вод Волги в каскаде водохранилищ

Трансформация водных масс в водохранилищах — весьма сложный процесс, протекающий под воздействием целого комплекса физико-географических и биологических факторов, а также под влиянием хозяйственной деятельности человека. Рассмотрим этот процесс на примере изменения свойств волжской воды при прохождении каскада водохранилищ в летний период. Особенностью данного периода является незначительное влияние боковой приточности на изменение характеристик рассматриваемой водной массы, продолжительное пребывание ее в водохранилищах при слабой сработке их в этом сезоне, массовое развитие водных беспозвоночных и растений. Трансформация волжских вод легко устанавливается по изменению двух основных характеристик — электропроводности и температуры.

Вода Волги в районе г. Калинина характеризуется в середине июня электропроводностью порядка 150 мксим./см и имеет температуру около 23° (Рутковский, 1964). С этими характеристиками она поступает в Ивановское водохранилище. Уже в верховьях его наблюдается заметное повышение электропроводности волжской воды, особенно между г. Калининым и дер. Поддубье, где она увеличивается на 40—50 мксим./см. Таким образом, трансформация волжской воды начинается с верховьев Ивановского водохранилища и выражается в основном в повышении ее минерализации.

При дальнейшем движении к плотине частично трансформированная волжская вода натекает на относительно холодные придонные воды водохранилища. Последние представляют собой трансформированные воды весеннего половодья, температура которых равна 15 — 16° , а электропроводность порядка 170—180 мксим./см. В результате перемешивания с ними происходит дальнейшая трансформация волжских вод, которая заключается в понижении их температуры и электропроводности.

В Угличское водохранилище из Ивановского водная масса поступает с электропроводностью порядка 170 мксим./см и температурой около

18 . Под влиянием местного стока, особенно в районах городов, электропроводность ее в этом водоеме несколько повышается. Однако общая тенденция к изменению электропроводности по ходу водной массы сохраняется такой же, как в Иваньковском водохранилище: по направлению к плотине электропроводность постепенно уменьшается и в непосредственной близости от нее значения электропроводности становятся равными величинам в верхнем бьефе Иваньковской ГЭС. Как по электропроводности, так и по температуре водные массы приплотинных участков этих водохранилищ близки между собой, и водная масса Угличского водохранилища представляет в основном воды Иваньковского, которые по мере своего перемещения на отдельных участках испытывают некоторую трансформацию, выражающуюся главным образом в повышении электропроводности.

Наиболее существенное изменение характеристик волжской воды происходит в Рыбинском водохранилище. Поступая в нижний бьеф Угличской ГЭС с электропроводностью порядка 180 мксим. см и температурой 18—19 , она быстро трансформируется. Прежде всего вследствие разбавления водами водохранилища происходит понижение ее электропроводности. Уже в районе выхода в расширенную часть Рыбинского водохранилища, на участке от сел. Сменцево до затопленного г. Мологи, электропроводность водной массы колеблется от 145 до 160 мксим./см. Изменение температуры волжских вод на этом участке водоема имеет в общем ту же тенденцию, что и в Угличском водохранилище, но при малой скорости перемещения водной массы на поверхностных горизонтах наблюдается интенсивный прогрев вод.

Резкое изменение характеристик волжской водной массы происходит в районе соприкосновения ее с водной массой центральной части водохранилища. С выходом в открытую часть водохранилища волжская водная масса как бы вклинивается в воды центральной части и в результате смешения с ними быстро теряет свои особенности: становится более теплой, менее цветной, прозрачность ее увеличивается, а электропроводность заметно понижается. Изменение свойств волжской водной массы в Рыбинском водохранилище летом настолько значительно, что в конечном итоге она теряет свою индивидуальность, иными словами, полностью трансформируется. Распространение ее летом по затопленной долине Волги ограничивается примерно районом бывшего г. Мологи.

Всю центральную часть Рыбинского водохранилища, в том числе приплотинный участок Рыбинской ГЭС, в этом сезоне заполняет однородная летняя водная масса, сформировавшаяся в самом водоеме. В зависимости от водности года и объема аккумулированной части половодья электропроводность ее меняется от 140 мксим. см в многоводном году (1962 г.) до 180 мксим./см в маловодном (1964 г.), а температура колеблется в пределах 16—19 .

Эта водная масса сбрасывается в речную часть Горьковского водохранилища, а поскольку боковая приточность последней по сравнению с объемом сбросов Рыбинской ГЭС невелика, вся она заполнена летней водной массой Рыбинского водохранилища. По ходу воды основные ее показатели меняются незначительно: электропроводность в пределах 10—20 мксим./см, а зональное повышение температуры не превышает 1.5 .

В озерной части Горьковского водохранилища летом некоторая неоднородность состава воды по ширине водоема отмечается лишь в приустьевых участках крупных притоков, где наблюдается локальное повышение электропроводности примерно на 20 мксим. см (Эдельштейн, 1965а). Однако воды притоков довольно быстро смешиваются с водной массой Рыбинского водохранилища и не вносят существенных изменений в ее характеристики. Вся приплотинная часть Горьковского водохранилища заполнена весьма

однородной водной массой с электропроводностью порядка 150—170 мксим. см и температурой 17—19°. Значения этих характеристик практически совпадают с величинами летней водной массы центральной части Рыбинского водохранилища и указывают на то, что последняя заполняет большую часть Горьковского водохранилища и в пределах его практически не меняет своих основных свойств. По крайней мере, весь участок старого русла Волги от Рыбинска до Горьковской ГЭС заполнен водой Рыбинского водохранилища. Это хорошо согласуется с данными К. К. Эдельштейна (1965а), по расчетам которого воды, сбрасываемые в летние месяцы на Рыбинское водохранилище, составляют свыше 80% приточности озерной части Горьковского водохранилища.

Поступая в нижний бьеф Горьковского водохранилища, эти воды сохраняют свои свойства до устья Оки. Ниже характеристики их резко меняются. Это видно прежде всего по электропроводности, которая в августе 1962 г. на середине Волги в 10 км ниже Оки повысилась почти вдвое и достигла 270—290 мксим./см, а в сентябре 1965 г. увеличилась от 170 до 370—420 мксим. см. Следовательно, наиболее интенсивная трансформация водной массы центральной части Рыбинского водохранилища происходит только ниже устья Оки, прежде всего под влиянием ее сильно-минерализованных вод.

Смешение вод Оки и Горьковского водохранилища происходит очень медленно и разность между химическим составом вод правого и левого бережной части потока, поддерживаемая высокоминерализованными водами правобережных притоков, сохраняется на всем незарегулированном участке Волги. Зона раздела между высокоминерализованными правобережными водами и водной массой, поступающей из Горьковского водохранилища, располагается почти в вертикальной плоскости по течению воды. Несмотря на высокие скорости течения, обеспечивающие однородное распределение электропроводности внутри каждой водной массы, градиент ее в зоне раздела настолько велик, что эта зона сохраняется на десятки километров. Лишь в районе городов Васильсурск и Чебоксары происходит полное смешение этих вод и поток по всей ширине Волги становится относительно однородным.

По своему режиму незарегулированный участок Волги ниже устья Оки близок к бытовым условиям. Относительно высокая скорость течения обеспечивает перемешивание вод с различными характеристиками. В результате смешения водной массы, поступающей из Горьковского водохранилища, с водами Оки и других притоков здесь формируется новая водная масса, по своим характеристикам близкая к воде Волги в бытовых условиях. Учитывая это, мы называли ее волжской водной массой. Она характеризуется электропроводностью порядка 170—270 мксим./см и температурой 18.2—19.5°. Значительные колебания электропроводности объясняются различной минерализацией вод притоков в районе формирования данной водной массы.

Таким образом, на участке Волги от устья Оки до г. Васильсурска происходит трансформация водной массы водохранилища в речную водную массу (Буторин, Курдина, 1968). С постройкой Чебоксарской ГЭС эта водная масса будет снова трансформироваться в водную массу водохранилища. Следовательно, регулируя сток реки, можно изменять в нужном направлении свойства воды.

Итак, в Куйбышевское водохранилище, как и в Иваньковское, поступает тоже речная волжская вода, но характеристики этих водных масс, в частности, их электропроводность, различны. Если в Иваньковское водохранилище волжская вода поступает с электропроводностью 150 мксим./см, то волжская водная масса, поступающая в Куйбышевское водохранилище, имеет электропроводность 220—280 мксим./см. Такая

электропроводность волжской водной массы в пределах Куйбышевского водохранилища сохраняется до устья Камы. Следовательно, в современных условиях волжская вода с характеристиками, близкими к естественным, ниже г. Калинина встречается лишь на участке Волги от устья Оки до устья Камы.

Кама является самым крупным притоком Волги. Электропроводность камской воды летом в естественных условиях была выше волжской на 70—80 мксим. см (Горюнов, 1936). Поскольку естественный межениный расход Камы был невелик, ее воды не вызывали значительного повышения электропроводности в Волге. После зарегулирования Камы летний сток ее увеличился, но роль камских вод в изменении характеристик волжской водной массы осталась прежней. Она сводится в основном к незначительному повышению электропроводности волжской воды. Поскольку больших различий в электропроводности волжской водной массы и вод Камы нет, смешение их происходит сравнительно быстро даже при малых скоростях течения. В процессе смешения происходит частичная трансформация этих вод и формируется водная масса Куйбышевского водохранилища, которая заполняет водоем от камского устья до плотины Волжской ГЭС им. В. И. Ленина.

Водная масса Куйбышевского водохранилища летом имеет электропроводность порядка 280—300 мксим./см и температуру около 19°. По мере перемещения ее к плотине эти характеристики несколько изменяются, причем тенденция к изменению их остается такой же, как на приплотинных участках Иваньковского, Уличского и Горьковского водохранилищ: электропроводность постепенно понижается, а температура поверхностного слоя воды повышается.

В результате этих изменений в нижний бьеф Куйбышевского водохранилища поступает водная масса с электропроводностью 240—260 мксим./см и температурой 19—21°. При перемещении ее в пределах Волгоградского водохранилища значения электропроводности и температуры постепенно увеличиваются и достигают максимальных значений в верхнем бьефе Волжской ГЭС им. XII съезда КПСС. Таким образом, если общая картина изменения температуры воды в Волгоградском водохранилище полностью совпадает с таковой для других водохранилищ волжского каскада, то в изменении электропроводности имеются некоторые отличия. В большинстве водохранилищ Волги электропроводность по ходу водной массы постепенно уменьшается и в непосредственной близости от плотины значения ее становятся минимальными. В Волгоградском водохранилище наблюдается обратная картина: с приближением к плотине электропроводность, хотя и незначительно, но систематически увеличивается. Это связано с особенностями водного режима водоема. При работе ГЭС на транзитной воде, во-первых, не происходит заметного разбавления вод, поступающих в водоем, ранее аккумулярованными водами, во-вторых, из-за высокой проточности водохранилища воды притоков не задерживаются в приустьевых участках, а вовлекаются в общий поток и быстро перемешиваются с водами Куйбышевского водохранилища. Поэтому за время перемещения водной массы по водоему даже незначительная боковая проточность несколько повышает ее общую минерализацию.

Таким образом, каскад волжских водохранилищ не только регулирует сток Волги, но и играет весьма существенную роль в изменении свойств волжской воды. При перемещении через каскад водохранилищ речные воды Волги и ее притоков полностью трансформируются.

Анализ изменения характеристик вод в летний период на участке от г. Калинина до г. Волгограда позволил не только проследить за их трансформацией, но и выявить районы и условия формирования новых водных масс и определить примерные границы их распространения (табл. 109).

Характеристики водных масс Волги и волжских водохранилищ от г. Калинина до Волжской ГЭС им. XII съезда КПСС

Водная масса	Занимаемый участок	VI 1 61		VII 1962		IX 1963	
		электропроводность, мксим. см	температура, °C	электропроводность, мксим. см	температура, °C	электропроводность, мксим. см	температура, °C
Воды Волги	До г. Калинина Иваньковское и Угличское водохранилища Рыбинское водохранилище Устье Оки—устье Камы Устье Камы Волжская ГЭС им. XII съезда КПСС	150	23.0	—	—	—	—
Трансформированные воды Волги		180	18—19	—	—	—	—
Рыбинского водохранилища		180	14.6	140—160	16.5—18.8	160—200	16.3—17.8
Волжская Куйбышевского водохранилища		—	—	170—270 235—285	18.2—19.5 19.0—20.5	200—420 270—305	17.5—18.5 18.0—20.5
							35—45 45—70 45 50

Из табл. 109 видно, что абсолютные значения характеристик водных масс даже при регулирующем влиянии водохранилищ, особенно таких, как Рыбинское, которое в значительной мере определяет постоянство физико-химических свойств поступающих из него вод, испытывают значительные колебания. Это связано прежде всего с водностью года, особенностями погоды в период наблюдений, морфометрией и другими местными условиями.

Сопоставляя данные о величине и характере изменения электропроводности и температуры водных масс Волги в условиях зарегулированного стока с теми же характеристиками в бытовых условиях (Бенинг, 1924; Горюнов, 1936), можно заметить существенные различия между ними. После образования каскада водохранилищ электропроводность и температура водных масс на участке от г. Калинина до плотины Волжской ГЭС им. XII съезда КПСС имеют значения, близкие к величинам в естественных условиях, лишь на незарегулированном участке реки. В зоне влияния водохранилищ в связи с замедленной сработкой аккумулярованных вод абсолютные значения и изменение этих характеристик существенно отличаются от наблюдавшихся в реке.

Вместо незначительного изменения электропроводности от устья Шексны до впадения Оки и систематического увеличения ее от Горького до Сызрани, которое наблюдалось А. А. Горюновым летом 1934 г., отмечается относительно ровный ход ее на участках водохранилищ с незначительным понижением в приплотинной части и в нижних бьефах ГЭС. Дело в том, что аккумуляция вод половодья понижает в летний период общую минерализацию вод водохранилищ, а растянутый сброс их обеспечивает пониженную электропроводность водных масс в каскаде волжских водохранилищ не только летом, но и в начале осени (Зенин, 1965). При всех обследованиях электропроводность вод на зарегулированных участках Волги оказалась ниже приводимой

А. А. Горюновым для бытовых условий, хотя общая тенденция к увеличению ее по ходу воды сохранилась.

Изменилась величина и распределение температуры воды в зонах подпора. Температура верхнего 3—4-метрового слоя воды по ходу ее систематически повышается. На речных участках водохранилищ и в незарегулированных участках. В этих глубоководных районах более ровный, чем на припловых участках. В этих глубоководных районах водохранилищ отмечается температурная стратификация водной толщи, чего не наблюдалось в естественных условиях.

Смена режима и характеристик водных масс Волги после зарегулирования ее стока вызвала соответствующие изменения в ходе биологических процессов. На определенных участках зарегулированной реки сформировались два типа биоценозов — речной и озерный. Это особенно четко видно по изменению состава и численности фитопланктона (Приймаченко, 1960), а также по распределению зоопланктона (Луфрова, 1963) и ихтиофауны (Ильина, 1959, 1960).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате многолетних исследований гидрологических процессов, протекающих в водохранилищах волжского каскада, выявлены закономерности изменения гидрологических условий реки при зарегулировании ее стока, особенности уровня, скоростного и температурного режимов в водохранилищах речного и озерного типов, установлена роль основных факторов, влияющих на режимные характеристики водохранилищ, изучена сезонная динамика взвесей и факторы, определяющие их состав и содержание, определены условия формирования грунтового комплекса водохранилищ и для ряда объектов составлены карты распределения грунтов, дана их характеристика и классификация.

В основе исследования гидрологических процессов лежит общий методический подход, сущность которого заключается в изучении формирования, динамики и трансформации водных масс в каскаде водохранилищ. В процессе исследований удалось получить ответ на многие поставленные вопросы.

1. Выяснено, что наиболее эффективным способом получения информации о физическом состоянии вод водоема, обеспечивающим раскрытие особенностей гидрологических процессов как в отдельных водохранилищах, так и в каскаде, являются синхронные съемки.

2. Выявлены различия в гидрологических процессах, протекающих в водохранилищах речного и озерного типов, зависимость их от физико-географических условий и режима работы гидросооружений, роль отдельных элементов режима в развитии биологических процессов.

3. Установлено наличие в водохранилищах генетически и качественно различных водных масс, существующих длительное время и хорошо различающихся между собой по комплексу характеристик, определены основные показатели и дана характеристика водных масс, сформулировано понятие водная масса для пресных водоемов.

4. Разработан новый метод выделения водных масс, применение которого позволяет оценивать различие водных масс по комплексу показателей, характеризующих физико-химические особенности вод. Применение для расчетов ЭВМ позволяет широко использовать данный метод в практике гидрологических исследований.

5. Выявлены особенности формирования водных масс в водохранилищах речного и озерного типов и установлены основные закономерности распространения их по сезонам года. Схемы сезонного распределения водных масс позволили вычислить объемные соотношения различных вод в Рыбинском водохранилище. Путем расчета процентного содержания водных масс по номограммам гидрологических характеристик доказана их неоднородность по вертикали.

6. Установлены основные особенности перемещения водных масс в водохранилищах различного типа и факторы, их обуславливающие.

Это позволяет косвенным путем решить проблему динамики вод в водоемах замедленного водообмена и более эффективно использовать их для целей промышленного и бытового водоснабжения и рационального ведения рыбного хозяйства и т. д.

7. Показана трансформация речных вод при прохождении через каскад водохранилищ. Установлено, что каскад волжских водохранилищ не только регулирует сток Волги, но и играет существенную роль в изменении свойств речных вод. При перемещении через каскад воды Волги и ее притоков значительно трансформируются. Этим доказывается возможность использования водохранилищ для регулирования качества воды. Выявлена решающая роль турбулентного обмена в изменении свойств водных масс водохранилищ.

8. Установлено, что смена режима и изменение характеристик речных вод после зарегулирования стока вызвали соответствующие изменения в ходе биологических процессов. На определенных участках зарегулированной реки сформировались два типа биоценозов — речной и озерный. Это особенно четко прослеживается по изменению состава и численности фитопланктона, а также по распределению зоопланктона и ихтиофауны.

SUMMARY

In the monograph the results of many yearly research of hydrological processes of the Volga reservoirs are stated. By an example of the Volga cascade regularities of changes of the river hydrological conditions when regulating its flow are revealed and peculiarities of level, speed and temperature of waters and bottom sediments regime in reservoirs of the river and lake type are shown. The author determined the role of main factors in the regime characteristics of reservoirs, studied seasonal dynamics of suspensions and factors determining their composition and content. In the monograph conditions of some reservoirs ground forming are defined, ground characteristics and classification are given and charts of their distribution are included. The author gives evaluation of the role of some hydrological regime elements in the development of some biological processes and changes of sewages entering reservoirs.

The main object of the author was: the study of regularities of formation, dynamics and water mass transformation in reservoirs cascade. Due to this a special attention in the monograph is paid to reality of existence of qualitatively different water masses in the same reservoir, to basing the indices characterizing water masses, revealing their physical meaning and working out new methods for water mass distinguishing. The author gives formula of the notion «water mass» and shows convincingly that this notion can be used for water mass of fresh water reservoirs.

On example of the Rybinsk and Gorky reservoirs peculiarities of water mass formation in reservoirs of river and lake types are shown and main peculiarities of their seasonal distribution determined. By diagrams of water mass seasonal distribution the volumetrical ratio of different waters is calculated and by computation of water mass percentage content and use of nomograms of hydrological characteristics heterogeneity of water thickness of vertical line is determined.

The existence of genetically heterogeneous water masses in reservoirs existing over a long period of time and differing by a complex of characteristics permits indirect determination of water formation peculiarities in reservoirs of slow exchange between different waters and use them more effectively for industrial and domestic water—supply.

The process of river water transformation when passing through reservoirs cascade is especially interesting. Reservoirs cascade not only regulates the Volga flow but also influences greatly the change of river waters characteristics. When moving through reservoir cascade waters of the Volga and its tributaries transform considerably. Due to this fact reservoirs can be used for regulation of water quality.

Change of regime and characteristics of river waters after regulation of flow produced corresponding changes in the course of biological processes.

On certain parts of river with regulated flow two types of biocenosis have formed: river and lake types.

It is especially well seen from change of composition and quantity of phytoplankton and by the distribution of zooplankton and ichthyofauna.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- А в а к я н А. Б., Ш а р а п о в В. А. 1968. Водохранилища гидростанций СССР. Изд. 2-е, Госэнергоиздат, М.—Л.
- А г е н о р о в В. К. 1944а. Об основных водных массах в гидросфере, о поверхностях и зонах, их разделяющих. Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., т. VIII, № 6.
- А г е н о р о в В. К. 1944б. Об основных водных массах в гидросфере. Тр. НИУ ГУГМС, сер. V. Гидрология моря, вып. 10. Гидрометеиздат, М.—Свердловск.
- А к и м о в И. К. 1953. О переработке берегов крупных водохранилищ на примере Рыбинского водохранилища. В кн.: Рыбинское водохранилище, ч. I. М.
- А л е к с и н О. А. 1948. Основы гидрохимии. Гидрометеиздат, Л.
- А л м а з о в А. М. 1956. О соотношении концентраций ионов в воде открытых лиманов. ДАН СССР, т. 108, № 5.
- А л ь б о м гидрографических характеристик речных бассейнов Европейской территории СССР, ч. I. 1955. Гидрометеиздат, Л.
- А н т и п о в а О. П. 1961. Рыбинское водохранилище. Изв. Гос. н.-иссл. инст. озерн. и речн. рыбн. хоз., т. 50.
- А н у ч и н Д. Н. 1897. Верхневолжские озера и верховья Западной Двины. Тр. Эксп. для исслед. источников главнейших рек Европ. России. М.
- А н у ч и н Д. Н. 1898. Озера области истоков Волги и верховьев Западной Двины (по исследованиям 1894—1895 гг.). М.
- А р х а н г е л ь с к и й В. А. 1947. Расчеты неустановившегося движения в открытых водоемах. Изд. АН СССР, М.—Л.
- А р х а н г е л ь с к и й А. М. 1954. Формирование берегов Рыбинского водохранилища. Изв. Всесоюзн. геогр. общ., т. 86, вып. 3.
- А ф а н а с ь е в а Е. А. 1940. Почвы нижней части реки Мологи и прилегающих частей Молого-Шекснинской низины. Тр. Почв. инст. им. В. В. Докучаева, т. XV, Изд. АН СССР, М.—Л.
- Б а к а с т о в С. С. 1960. Некоторые данные по донным температурам Рыбинского водохранилища в подледный период. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 8—9.
- Б а к а с т о в С. С. 1963. Донный термошуп. Матер. Первого н.-техн. совещ. по изуч. Куйбышев. водохр., вып. I, Куйбышев.
- Б а к а с т о в С. С. 1965. Распределение и динамика температуры дна Рыбинского водохранилища в зимний период. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (10), изд. «Наука», М.—Л.
- Б а л а г у р о в М. А. 1957. Опыт эксплуатации Волжского каскада. Матер. н.-техн. совещ. по работе гидроэлектростанций в каскаде (тезисы докл.), вып. 1, Запорожье.
- Б а л а ш о в а И. В. 1954. Краткосрочные прогнозы замерзания зарегулированных рек (на примере Верхней Волги). Тр. ЦИП, вып. 34 (61), Гидрометеиздат, М.
- Б е з л е р Ф. И. 1963. Сезонные изменения химических свойств вод Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 5 (8), Изд. АН СССР, М.—Л.
- Б е л а в с к а я А. П. и Т. А. П а в л о в а. 1961. Растительность и почвы ложа Горьковского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 4 (7), Изд. АН СССР, М.—Л.
- Б е л ы х Ф. И. 1956. Формирование берегов и естественное очищение Рыбинского водохранилища. Тезисы докл. на Первом. н.-техн. совещ. по проектированию, строительству и эксплуатации водохр. электрост. Львов.
- Б е л ы х Ф. И. 1959а. О методе расчета среднего уровня Рыбинского водохранилища. Тр. Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 1, Гидрометеиздат, М.

- Белых Ф. И. 1959б. Учет зарегулированного стока на верхововолжских гидроэлектростанциях на примере Щербаковской ГЭС. Гр. III Всесоюзн. гидрол. съезда, т. VIII, Гидрометеопиздат, Л.
- Бенинг А. Л. 1924. К изучению придонной жизни реки Волги. Саратов.
- Берникова Т. А. 1960. О методике анализа водных масс на примере Норвежского моря. Тр. Балт. НИРО, вып. VI, Пищепромиздат, М.
- Близняк Е. В., Андреев В. Г. 1958. Исследования озер и водохранилищ в СССР. Тр. III Всесоюзн. гидрол. съезда, т. I, Гидрометеопиздат, Л.
- Богословский Б. Б. 1951. О термическом режиме озера Глубокого в безледный период. Вопр. геогр., сб. 26. М.
- Богословский Б. Б. 1960. Озероведение. Изд. МГУ.
- Богуславский Н. А. 1887. Волга как путь сообщения. Сб. Инст. инженеров путей сообщ., вып. IX, СПб.
- Большаков В. С. и др. 1964. Характеристика водных масс северо-западной части Черного моря. Наук. Зап. Одеськ. биол. ст. АН УРСР, вып. 5. Одесса.
- Боровкова Г. Н., Никулин П. И., Широков В. М. 1962. Куйбышевское водохранилище. Куйбышев. книжн. изд.
- Бородкин Б. С. и Павлов Б. К. 1962. Зимний термический режим Горьковского водохранилища. Тр. Ленингр. инст. водн. транспорта, вып. 26, изд. «Речной транспорт», Л.
- Браславский А. П. 1952. Расчет ветровых волн. Тр. ГИ, вып. 35 (89).
- Брукс К., Карузерс Н. 1963. Применение статистических методов в метеорологии. Гидрометеопиздат, Л.
- Брянцев В. А. 1963. Водные массы Ново-Шетландского шельфа. Тр. Атлант. НИРО, вып. X, Калининград. книжн. изд.
- Бубиов В. А., Косарев А. Н. 1964. Распределение водных масс в Атлантическом океане на разрезе по меридиану 30° в. д. Тр. Морск. гидрофиз. инст. АН УССР, т. 30, изд. «Наукова думка», Киев.
- Бурков В. А. 1958. К гидрологии Командоро-Камчатского района Тихого океана в весеннее время. Тр. Инст. океанол., т. 27, Изд. АН СССР, М.
- Бурков В. А. 1961. К методике изучения гидрологических явлений в приливных районах морей. Тр. Инст. океанол. АН СССР, т. 38, Изд. АН СССР, М.
- Бутории Н. В. 1958а. Изменение основных гидрологических характеристик Горьковского водохранилища в период заполнения. Тезисы докл. Всесоюзн. совещ. по вопр. рыбхоз. освоения водохр. Л.
- Бутории Н. В. 1958б. Изменения скоростного режима Волги в зоне подпора Горьковской ГЭС. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 1.
- Бутории Н. В. 1958в. О скоростях течения Волги от Рыбинска до Сталинграда. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 2.
- Бутории Н. В. 1959а. Краткая гидрологическая характеристика Волги на участке Горьковского водохранилища. Тр. VI. совещ. по пробл. биол. внутр. вод, Изд. АН СССР, М.—Л.
- Бутории Н. В. 1959б. О прозрачности и мутности воды Горьковского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2 (5), Изд. АН СССР, М. Л.
- Бутории Н. В. 1959в. К вопросу о проточности Ивановского и Угличского водохранилищ. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 3.
- Бутории Н. В. 1960. О проточности зоны подпора Куйбышевского водохранилища. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 8—9.
- Бутории Н. В. 1962. О температурном расслоении водной массы Рыбинского водохранилища. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 12.
- Бутории Н. В. 1963а. Формирование гидрологического режима Горьковского водохранилища (1955—1959 гг.). Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 5 (8), Изд. АН СССР, М.—Л.
- Бутории Н. В. 1963б. Гидрологические условия Куйбышевского водохранилища в период заполнения. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 5 (8), Изд. АН СССР, М.—Л.
- Бутории Н. В. 1963в. Уровень Рыбинского водохранилища и его колебания (1948—1960 гг.). Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 5 (8), Изд. АН СССР, М.—Л.
- Бутории Н. В. 1963г. Температура воды Рыбинского водохранилища в период замерзания. В сб.: Матер. по биол. и гидрол. волж. водохр., Изд. АН СССР, М.—Л.
- Бутории Н. В. 1964. О водных массах континентальных водоемов в связи с изучением их балансовых характеристик. Совещ. по вопр. круговорота вещества и энергии в озерн. водоемах. Тезисы докл. Сиб. отд. АН СССР, пос. Лиственничное на Байкале.
- Бутории Н. В. 1965а. О водных массах континентальных водоемов. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (10), изд. «Наука», М.—Л.
- Бутории Н. В. 1965б. К изучению водных масс Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (10), изд. «Наука», М.—Л.

- Б у т о р и н Н. В. 1965в. Синхронные гидрологические съемки на Рыбинском водохранилище. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 7 (10), изд. «Наука», М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В. 1966а. Сезонное изменение характеристик водных масс и распределение их в Рыбинском водохранилище. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 12 (15), изд. «Наука», М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В. 1966б. О вертикальной неоднородности водных масс Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 12 (15), изд. «Наука», М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В. 1966в. К изучению горизонтальной циркуляции водных масс Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 10 (13), изд. «Наука», М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В. 1968а. О механизме трансформации водных масс в водохранилищах. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 16 (19), изд. «Наука», М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В. 1968б. Характеристика вод Рыбинского водохранилища и их циркуляции. Вестн. МГУ, № 1.
- Б у т о р и н Н. В., Бакастов С. С., Ершова М. Г. 1962. Размеры затопляемых площадей береговой зоны Рыбинского водохранилища при различной высоте его уровня. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 13.
- Б у т о р и н Н. В. и Бакулин К. А. 1963. Структура скоростного поля зимнего потока на разрезе Борок—Коприно. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 6 (9), Изд. АН СССР, М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В. и Курдина Т. Н. 1965. Характеристика гидрологических сезонов Рыбинского водохранилища. В сб.: Биологические процессы во внутренних водоемах, изд. «Наука», М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В., Курдина Т. Н. 1968. Изменение электропроводности и температуры водных масс в водохранилищах Средней Волги. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, изд. «Наука», М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В., Курдин В. П., Тачалов С. Н. 1966. Скоростной режим нижнего бьефа при постоянных расходах Рыбинской ГЭС. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 3, Гидрометеониздат, Л.
- Б у т о р и н Н. В. и Литвинов А. С. 1962. Опыт применения самописца течений Ю. А. Алексеева для изучения скоростного режима водохранилищ. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 12.
- Б у т о р и н Н. В. и Литвинов А. С. 1963а. О перспективах применения самописцев течений для изучения скоростного режима водохранилищ. Матер. Первого н.-техн. совещ. по изуч. Куйбышев. водохр., вып. 1, Куйбышев.
- Б у т о р и н Н. В. и Литвинов А. С. 1963б. О течениях в Рыбинском водохранилище. Тр. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, вып. 6 (9), Изд. АН СССР М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В., Литвинов А. С. 1968. Расчет коэффициентов турбулентного обмена в Рыбинском водохранилище. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, изд. «Наука», М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В., Смирнов Н. П. 1968а. Опыт применения электронной вычислительной машины для изучения водных масс Рыбинского водохранилища. Информ. бюлл. Инст. биол. внутр. вод. АН СССР, № 2.
- Б у т о р и н Н. В., Смирнов Н. П. 1968б. Исследование водных масс континентальных водоемов с использованием ЭВМ. В сб.: Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, изд. «Наука», М.—Л.
- Б у т о р и н Н. В., Эдельштейн К. К. 1961. Опыт применения электро-бифилярной вертушки (ЭБВ-7) для изучения течений Рыбинского водохранилища. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 11.
- Б у т о р и н Н. В. и Эдельштейн К. К. 1965. К изучению втекания, распределения и перемещения водных масс в вслжских водохранилищах. Научн. докл. по вопр. самоочищения водоемов и смещения сточных вод (1-й Всесоюз. симпозиум). Таллин.
- Б у ш м а к и н И. В. 1898. К вопросу о питании Верхней Волги. СПб.
- Б у ш м а к и н И. В. 1902. Исследования для устройства дополнительного водоснабжения Верхней Волги, ч. I. СПб.
- Б у ш м а к и н И. В. 1904. О результатах исследований, произведенных для устройства дополнительного водоснабжения Верхней Волги. СПб.
- Б ы к о в Н. А. 1940. Смешение вод рек Оки и Волги. Сб. статей. Горьковский инж.-строит. инст.
- В а й с б а н д В. Б. 1959. Применяемые методы наблюдений и прогноза ветрового волнения на Рыбинском водохранилище. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 1, Гидрометеониздат, М.
- В е л и к а н о в М. А. 1949. Динамика русловых потоков. Изд. 2, доп. и перераб. Гидрометеониздат, Л.

- Великанов Д. А. 1958. Почвенный покров и почвенные районы Ярославской области. Уч. зап. Яросл. гос. пед. инст., вып. XX (XXX), ч. 2.
- Вендров С. Л. 1955. О динамике береговой зоны Цимлянского водохранилища. Изв. АН СССР, сер. геогр., № 5.
- Вендров С. Л. 1959а. Проблемы формирования рельефа чаши (берегов и дна) больших водохранилищ. Матер. Второго геоморфол. совещ., № 3.
- Вендров С. Л. 1959б. Исследование руслового режима больших водохранилищ. В сб.: Комплексне використання водн. ресурсів України, Київ.
- Верещагин Г. Ю. 1927. Некоторые данные о режиме глубинных вод Байкала в районе Маритуй. Тр. Комисс. по изуч. оз. Байкал, II, Изд. АН СССР, Л.
- Верещагин Г. Ю. 1936. Основные черты вертикального распределения динамики водных масс на Байкале. Сб., посвящ. акад. В. И. Вернадскому, Изд. АН СССР, М.—Л.
- Волжский и Камский каскады гидроэлектростанций. 1960. Под общ. ред. Г. А. Руссо. Госэнергоиздат, М.—Л.
- Волков Л. Н., Филиппов А. Т. 1960. Водоохранилище Сталинградской ГЭС. Бюлл. и-техн. информ. гидропроекта, № 8—9.
- Воронков П. П. 1951а. Основы расчета изменений минерализации воды водохранилищ волжской системы. Тр. ГГИ, вып. 33 (87), Гидрометеиздат, Л.
- Воронков П. П. 1951б. Некоторые особенности формирования ионного состава воды водохранилищ в зоне избыточного увлажнения. Тр. ГГИ, вып. 33 (87), Гидрометеиздат, Л.
- Воронков П. П. 1951в. Основные черты формирования режима ионного состава поверхностных вод в условиях Севера. Тр. ГГИ, вып. 33 (87), Гидрометеиздат, Л.
- Вороилов П. П. 1963. Основные факторы и закономерности формирования химического состава воды малых водоемов. Тр. ГГИ, вып. 102, Гидрометеиздат, Л.
- Воскресенский К. П. 1962. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. Гидрометеиздат, Л.
- Вотинцев К. К. 1961. Гидрохимия озера Байкал. Тр. Байкальской лимнол. ст., т. 20, Изд. АН СССР, М.
- Вотинцев К. К., Поповская Г. И., Мазепова Г. Ф. 1963. Физико-химический режим и жизнь планктона Селенгинского района озера Байкал. Тр. Лимнол. инст. АН СССР (Сиб. отд.), т. 7 (27), Изд. АН СССР.
- Гавемаи А. В. 1955. Московское море. Изд. 2, доп. и перераб. Калинин.
- Гезенцвей А. Н. 1959. О зависимости коэффициента горизонтального макрообмена в море от периода осереднения пульсации скорости течения. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 1.
- Гезенцвей А. Н. 1961. О горизонтальном макротурбулентном обмене в Черном море. Тр. Инст. океанол. АН СССР, т. 52, Изд. АН СССР, М.
- Гильдеблат Я. Д., Макулов В. В., Семиколенов А. С. 1948. Неустановившийся режим нижнего бьефа гидростанции. Пробл. регулирования речного стока, вып. 2, Изд. АН СССР, М.—Л.
- Горбунев Г. П. 1934. Биологические индикаторы и их значение в исследовании Арктики. Arctica, кн. II. Изд. Всесоюз. Аркт. инст., Л.
- Горин Ю. И. 1968. Некоторые данные о структуре вод Черемшанского залива Куйбышевского водохранилища. Информ. бюлл. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, № 2.
- Горюнов А. А. 1936. Электропроводность воды р. Волги. Тр. ГГИ, вып. 3.
- Давыдов Л. К. 1953. Гидрография СССР (воды суши), ч. I. Общая характеристика вод. Изд. ЛГУ.
- Давыдов Л. К. 1955. Гидрография СССР (воды суши), ч. II. Гидрография районов. Изд. ЛГУ.
- Дзюбан Н. А. 1960. О районировании Куйбышевского водохранилища. Бюлл. Инст. водохр. АН СССР, № 8—9.
- Дзюбан Н. А. и Елисеев А. И. 1966. Некоторые особенности гидрологического режима и биологических процессов в Черемшанском заливе Куйбышевского водохранилища. Сб. работ Комсомольской гидрометеорол. обсерв., вып. 6, Гидрометеиздат, Л.
- Дик Н. Е. 1938. Геоморфология юго-восточной части Калининской области. Уч. зап. МГУ, вып. 23, география.
- Дмитриев А. А. и Бончковская Т. В. 1953. К вопросу о турбулентности в волне. ДАН СССР, т. 91, № 1.
- Добровольский А. Д. 1948. К вопросу о физико-химических индикаторах для водных масс. Проблемы Арктики, № 1.
- Добровольский А. Д. 1961. Об определении водных масс. Океанология, т. 1, вып. 1.
- Добротинский С. В. 1947. Турбулентная вязкость в поверхностном слое моря и волнение. ДАН СССР, т. 58, № 7.

- Д о л г о в Г. И. 1928. О неоднородности воды в реке. Русск. гидробиол. журн., т. VII, № 3 4.
- Д о л г о в Г. И. 1954. Определение удельной электропроводности в практике водных исследований. Всесоюзн. н.-иссл. инст. водоснаб. канализации, гидротехн. сооруж. и инж. гидрогеологии, М.
- Д о р о ш е в с к и й А. Г. и Д в о р ж а н ч и к С. В. 1913. К вопросу о применении электропроводности при исследовании естественных вод. Журн. русск. физ.-хим. общ., часть химическая, т. 45, вып. 7, СПб.
- Д р а ч е в С. М. 1956. Водохранилища и каналы как источники хозяйственно-питьевого водоснабжения. Медгиз, М.
- Д р а ч е в С. М., С о л о г у б А. М. 1956. Рыбинское водохранилище как источник хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гр. научн. конфер. по изуч. Вологодской обл. Вологда.
- Д у б р о в и н Б. И. 1965. Объемный статистический T, S-анализ водных масс Аравийского и Красного морей. Океанология, т. V, вып. 4.
- Е г н а з а р о в И. В. 1937. Неустановившееся движение в длинных бьефах. Изв. ВНИИГ, т. 21.
- Е л и с е е в А. И. 1963. Динамика водных масс и распределение течений в Приплотинном плесе Куйбышевского водохранилища. Матер. Первого н.-техн. совещ. по изуч. Куйбышевск. водохр., вып. 1. Куйбышев.
- 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. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (10), изд. «Наука», М.—Л.
- Е р ш о в а М. Г. 1968а. О применении статистических методов к выделению водных масс в водохранилищах. Информ. бюлл. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, № 2.
- Е р ш о в а М. Г. 1968б. Водные массы Череповецкого водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 17 (20), изд. «Наука», М.—Л.
- Е р ш о в а М. Г., Э д е л ь ш т е й и К. К. 1964. Оценка точности определения электропроводности воды как показатель водных масс водохранилищ. Матер. XVIII гидрохим. совещ. (тезисы докл.). Новочеркасск.
- Ж и в а г о А. В. 1951. Основные закономерности развития берегов Рыбинского водохранилища. Изв. АН СССР, сер. геогр., № 4.
- Ж и в а г о А. В. 1954. Современные геоморфологические процессы на берегах Кубенского озера и Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. океанол. АН СССР, т. 10, Изд. АН СССР, М.
- З а й к о в Б. Д. 1938. Изменчивость годового стока рек СССР. Сб. ГГИ, № 1, Гидрометеиздат, Л.—М.
- З а й к о в Б. Д. 1944. Внутригодовое распределение речного стока на территории Европы. Гидрометеиздат, Свердловск—М.
- З а й к о в Б. Д. 1946. Средний сток и его распределение в году на территории Кавказа. Тр. НИУ ГУГМС, сер. IV, вып. 40, Гидрометеиздат, Л.
- З е н и н А. А. 1961. Неоднородность состава волжской воды и процессы смешения ее водных масс. Гидрохим. матер., т. XXXI, Изд. АН СССР, М.
- З е н и н А. А. 1964. Гидрохимический режим Горьковского водохранилища. Гидрохим. матер., т. XXXVI, Гидрометеиздат, Л.
- З е н и н А. А. 1965. Гидрохимия Волги и ее водохранилищ. Гидрометеиздат, 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 (5), Изд. АН СССР, М.—Л.
- З и м и н о в а Н. А. 1963. Количественная характеристика взвесей Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 6 (9), Изд. АН СССР, М.—Л.
- З и м и н о в а Н. А. 1966. О влиянии гидрометеорологических условий на процесс замучивания в Рыбинском водохранилище. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 3, Гидрометеиздат, Л.
- З и м и н о в а Н. А. 1967. Факторы, определяющие количество и состав взвешенных веществ в Рыбинском водохранилище. В сб.: Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах, изд. «Наука», М.
- З о л о т а р е в Г. С. 1954. Работы геологического факультета Московского университета в 1951 г. по изучению переработки берегов водохранилищ. Тр. Инст. океанол. АН СССР, т. 10, Изд. АН СССР, М.
- З о л о т а р е в Г. С. 1958. Некоторые итоги изучения переработки берегов Куйбышевского и Рыбинского водохранилищ. Изд. МГУ.
- З у б о в Н. Н. 1938. Морские воды и льды. Гидрометеиздат, М.
- З у б о в Н. Н. и С а б и и н К. Д. 1958. Вычисление уплотнения при смешении морских вод. Гидрометеиздат, М.

- Иванов А. А. 1948. О воллах в мелководных водоемах. Тр. Морск. гидрофиз. инст., т. I, Изд. АН СССР, М. Л.
- Иванов В. С. 1959. Переформирование берегов Рыбинского водохранилища. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 1, Гидрометеопиздат, Л.
- Иконников Л. Б. 1959. Некоторые итоги изучения формирования прибрежных отмелей на Горьковском водохранилище. Матер. к IV конфер. научн. сотрудников и аспирантов Лаборатории гидрогеол. проблем АН СССР, М.
- Ильина Л. К. 1960. Об эффективности размножения рыб и распределении молоди в Горьковском водохранилище. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 3 (6), Изд. АН СССР, М. Л.
- Казанцев Г. В. 1936. Сезонное колебание стока на юге Европейской части СССР. В сб.: Исслед. рек СССР, вып. VIII, Изд. отдел ЦУЕГМС, Л.
- Казаровец П. М. 1960. Применение кондуктометрического метода к изучению распределения водных масс Рыбинского водохранилища. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 7.
- Каравая В. И., Радзиховская М. А. 1965. Объемы основных водных масс северной части Тихого океана. Океанология, т. V, вып. 2.
- Караушев А. В. 1946. Турбулентная диффузия и метод смешения. Тр. НИУ ГУГМС, сер. IV, вып. 30, Гидрометеопиздат, Л.
- Караушев А. В. 1947. Распределение скоростей и коэффициентов турбулентного обмена по вертикали. Тр. ГГИ, вып. 2 (56), Гидрометеопиздат, Л.
- Караушев А. В. 1955. Гидравлика рек и водохранилищ (в задачах). Изд. «Речной транспорт», Л.
- Караушев А. В. 1960. Стовно-нагонные явления на водохранилищах и озерах. Гидрометеопиздат, Л.
- Караушев А. В. 1961. Течения в озерах и водохранилищах. В сб.: Гигиена водохранилищ, Медгиз, М.
- Кондрацова О. Ф. 1965. Тепловыпас Рыбинского водохранилища и его сезонные изменения. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (10), изд. «Наука», М.—Л.
- Косарев Н. А. 1962. Водные массы Каспийского моря. Вестн. МГУ, сер. V, географич., № 5.
- Косарев Н. А. 1966. О водных массах экваториальной части Атлантического океана. Океанология, т. VI, вып. 3.
- Кренке А. Н. 1958. Материалы по течениям Рыбинского водохранилища. Тр. Биол. ст. «Борок», вып. 3, Изд. АН СССР, М.—Л.
- Кривенцов М. И. 1954. Об ожидаемой минерализации вод Сталинградского и Куйбышевского водохранилищ. Гидрохим. матер., т. XXII, Изд. АН СССР, М.
- Кривенцов М. И. 1957. Гидрохимический режим Пролетарского водохранилища. Гидрохим. матер., т. XXVI, Изд. АН СССР, М.
- Кривенцов М. И., Лазарев К. Г., Фесенко Н. Г. 1953. К вопросу о минерализации воды Куйбышевского водохранилища и части р. Волги от водохранилища и до г. Вольска. Гидрохим. матер., т. XX, Изд. АН СССР, М.
- Крицкий С. И., Менкель М. Ф., Россинский К. И. 1947. Зимний термический режим водохранилищ, рек и каналов. Госэнергиздат, М.
- Кудрявцев Д. Д. 1950а. Сравнительная характеристика гидрохимического режима водохранилищ Верхней Волги: Ивановского, Угличского и Рыбинского. Тр. Биол. ст. «Борок», вып. 1, Изд. АН СССР, М.—Л.
- Кудрявцев Д. Д. 1950б. Физико-химические свойства донных (иловых) отложений Волжского отрога Рыбинского водохранилища. Тр. Биол. ст. «Борок», вып. 1, Изд. АН СССР, М.—Л.
- Кузин П. С. 1936. Зависимость годового стока р. Волги у Ярославля от метеорологических факторов. В сб.: Исслед. рек СССР, вып. VIII, Изд. отдел ЦУЕГМС, Л.
- Кузин П. С. 1950. Испарение с поверхности суши на территории СССР. Тр. ГГИ, вып. 26 (80), Гидрометеопиздат, Л.
- Кузнецов С. И. 1952. Роль микроорганизмов в круговороте веществ в озерах. Изд. АН СССР, М.
- Курдина Т. Н. 1956. К анализу среднедекадных температур воды в Рыбинском водохранилище. Метеорология и гидрология, № 8.
- Курдина Т. Н. 1958. Температура воды в Рыбинском водохранилище и ее динамика. Тр. Биол. ст. «Борок», вып. 3, Изд. АН СССР, М.—Л.
- Курдина Т. Н. 1959. Элементы гидрологического режима и водный баланс Угличского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2 (5), Изд. АН СССР, М.—Л.
- Курдин В. П. 1959. Классификация и распределение грунтов Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 1 (4), Изд. АН СССР, М.—Л.
- Курдин 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. 1961. Основные положения о процессах образования и распределения грунтов в верхневолжских водохранилищах Ихтиол комисс. Тр. совещ., вып. 11, Изд. АН СССР, М. — Л.
- Л а с т о ч к и н Д. А. 1936. Гидробиологические исследования рек Волги и Мологи. Тр. Ивановск. с.-х. инст., вып. 2, Гос. изд. Ивановск. обл.
- Л а т у н В. С. 1960. О характере зависимости коэффициента горизонтального турбулентного перемешивания в море от периода осереднения пульсации скорости течения. Метеорология и гидрология, № 7.
- Л е в ч е н к о С. П. 1949. Волновой режим Рыбинского водохранилища по наблюдениям 1942—1943 гг. Тр. Морск. гидрофиз. инст. т. II, Изд. АН СССР, М.—Л.
- Л е о н о в А. К. 1959. Водные массы Охотского моря. Вестн. ЛГУ, сер. геол. и геогр. № 24, вып. 4.
- Л е о н о в А. К. 1960. Региональная океанография, ч. I. Гидрометеиздат, Л.
- Л е о н т ъ е в а В. В. 1966. Характеристика водных масс северной части Тихого океана. Океанол. исслед., X раздел программ МГГ, № 15. Изд. «Наука», М.
- Л е п н е в а С. Г. 1950. Жизнь в озерах. Жизнь пресных вод СССР, т. III. Изд. АН СССР, М.—Л.
- Л и т в и н о в А. С. 1965. Гидрологическая характеристика Сбросного плеса Рыбинского водохранилища в навигационный период. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (10), изд. «Наука», М.—Л.
- Л и т в и н о в А. С. 1966. Некоторые данные о ветровых течениях в Рыбинском водохранилище. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 3, Гидрометеиздат, Л.
- Л и т в и н о в А. С. 1968а. Об измерении течений в водохранилищах самопсами БПВ-2-р. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 16 (19), изд. «Наука», М.—Л.
- Л и т в и н о в А. С. 1968б. О распространении волн попусков в нижнем бьефе Угличской ГЭС. Информ. бюлл. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, № 2.
- Л и т л Дж., М у р т и К., С у н н и Д., К э р е л К. 1965. Алгоритмы для решения задачи о коммивояжере. Экономика и мат. методы, т. I, вып. 1.
- Л у к и н А. В. 1958. Первые годы существования Куйбышевского водохранилища и условия формирования в нем стада промысловых рыб. Тр. Татарск. отд. ВНИОРХ, вып. 8, Казань.
- Л у ф е р о в а Л. А. 1963. Формирование зоопланктона Горьковского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод, вып. 6 (9), Изд. АН СССР, М.—Л.
- Л ь в о в и ч М. И. 1938. Опыт классификации рек СССР, Тр. ГГИ, вып. 6, Гидрометеиздат, Л.—М.
- М а к к а в е е в В. М. 1931. К теории турбулентного режима и взвешивания наносов. Изв. ГГИ, № 32.
- М а к к а в е е в В. М. 1952. Вопросы теории речного потока и проблемы турбулентности. Сб. тр. Ленингр. отд. Всесоюзн. научн. инж.-техн. общ. водного транспорта, Речиздат, Л.
- М а к к а в е е в В. М. и К о н о в а л о в И. М. 1940. Гидравлика. Речиздат, Л.
- М а м а е в О. И. 1963. Океанографический анализ в системе α -S-T-р. Под ред. проф. А. Д. Добровольского. Изд. МГУ.
- М а м а е в О. И. 1965. К методике анализа водных масс океана. Вестн. МГУ, сер. V, геогр., № 4.
- М а т е р и а л ы наблюдений на Горьковском водохранилище 1961 г. (Дополнение к Гидрол. ежегодн., т. 4, вып. 1—3). 1963. Горький.
- М и р ч и н к Г. Ф. 1935. Четвертичная история долины р. Волги выше Мологи. Тр. Комисс. по изуч. четвертичн. периода, т. IV, вып. 2, Изд. АН СССР, М.—Л.
- М о л ч а н о в И. В. 1945. Ладожское озеро. Гидрометеиздат, Л.—М.
- М о л ч а н о в И. В. 1946. Онежское озеро. Гидрометеиздат, Л.
- М о р д у х а й - Б о л т о в с к о й Ф. Д. 1955. Распределение бентоса в Рыбинском водохранилище. Тр. Биолог. ст. «Борок», вып. 2, Изд. АН СССР, М.—Л.
- М о р и ч е в а Н. П. 1965. Карбонатно-кальциевое равновесие в воде р. Волги и ее водохранилищ. Гидрохим. матер., т. XXXIX, Гидрометеиздат, Л.
- М о р о ш к и н К. В. 1955. Водные массы северо-западной части Тихого океана в районе Курило-Камчатской впадины. Тр. Инст. океанол. АН СССР, т. 12, Изд. АН СССР, М.—Л.
- М о р о ш к и н К. В. 1966. Водные массы Охотского моря. Изд. «Наука», М.
- М о с к а л е н к о Л. В., О в ч и н и к о в И. М. 1965. Водные массы Средиземного моря. В сб.: Основные черты геол. строения, гидрол. режима и биологии Средиземного моря. Изд. «Наука», М.
- М о с к в и т и н А. И. 1947. Молого-Шекснинское межледниковое озеро. Тр. Инст. геол. наук АН СССР, вып. 88, сер. геол., № 26, Изд. АН СССР, М.
- М у р а в е й с к и й С. Д. 1946. Процесс стока как географический фактор. Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., т. X, № 3.
- 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 практической медицины, кн. X. СПб.

- Никифоров Е. Г., Белишева Е. В., Блинов Н. И. 1966. О структуре водных масс восточной части Арктического бассейна. Океанология, т. VI, вып. 1.
- Никитин П. И. 1958. Гидрометеорологический режим Куйбышевского водохранилища. Речной транспорт, № 4.
- Новицкий В. П. 1964. Вертикальное строение водной толщи и общие черты циркуляции вод Черного моря. Тр. Азово Черноморск. н.-иссл. инст. морск. рыб. хоз. и океаногр., вып. 23, Пищепромиздат, М.
- Овчинников И. Ф. 1950. Краткий очерк Рыбинского водохранилища. Тр. Биол. ст. «Борок», вып. 1, Изд. АН СССР, М.—Л.
- Овчинников И. М. 1965. Водные массы Средиземного моря. В сб.: Основные черты геол. строения, гидрол. режима и биологии Средиземн. моря, изд. «Наука», М.
- Овчинников И. М., Плахин Е. А. 1965. О формировании глубинных водных масс Средиземного моря. Океанология, т. V, вып. 4.
- Озмидов Р. В. 1957. Экспериментальное исследование горизонтальной турбулентной диффузии в море и искусственном водоеме небольшой глубины. Изв. АН СССР, сер. геофиз., № 6.
- Озмидов Р. В. 1959. Исследование среднемасштабного горизонтального турбулентного обмена в океане при помощи радиолокационных наблюдений над плавающими буями. ДАН СССР, т. 126, № 1.
- Плахин Е. А. 1965. Некоторые замечания о глубинных водных массах восточного бассейна Средиземного моря. Вестн. МГУ, сер. V, геогр., № 5.
- Плешков Я. Ф. 1951. Солевой режим водохранилищ. Гидрохим. матер., т. XIX, Изд. АН СССР, М.
- Поддубный А. Г. и Фортунатов М. А. 1961. Проблема рыбохозяйственного использования водохранилищ разных географических зон. Вопр. ихтиол., т. 1, вып. 4 (21), Изд. АН СССР, М.
- Попов Г. И. 1948. Прогноз солености вод Кумовского водохранилища канала Волга—Дон и воды р. Дона ниже этого водохранилища. Гидрохим. матер., т. XV, Изд. АН СССР, М.
- Приймаченко А. Д. 1960. Состав и основные закономерности распределения биомассы фитопланктона в водохранилищах равнинных рек СССР. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 3 (6), Изд. АН СССР, М. Л.
- Рабинovich Е. 1953. Фотосинтез, т. II. Пер. с англ. ИЛ, М.
- Радзиховская М. А. 1961. Водные массы Японского моря. В сб.: Основные черты геол. и гидрол. Японского моря. Изд. АН СССР, М.
- Радзиховская М. А. 1965. Объемы основных водных масс южной части Тихого океана. Океанология, т. V, вып. 5.
- Россолимо Л. Л. 1929. Термика Косинских озер. Тр. Косинск. биол. ст., вып. 10, Главнаука, М.
- Россолимо Л. Л. 1934. Задачи и установки лимнологии как науки. Тр. Лимнол. ст. в Косине, вып. 17, М.
- Россолимо Л. Л. 1950. Некоторые данные по илонакоплению в Иваньковском водохранилище. Тр. Всесоюз. гидробиол. общ. АН СССР, т. 2.
- Россолимо Л. Л. 1957. Температурный режим озера Байкал. Тр. Байкал. лимнол. ст., т. XVI, Изд. АН СССР, М.
- Россолимо Л. Л. 1964. Основы типизации озер и лимнологического районирования. В сб.: Накопление вещества в озерах, изд. «Наука», М.
- Рутковский В. И. 1958. Предварительные итоги первой гидрологохимической синхронной съемки Рыбинского водохранилища. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 2.
- Рутковская В. И. 1963а. Температурный режим Рыбинского водохранилища. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 5 (8), Изд. АН СССР, М.—Л.
- Рутковский В. И. 1963б. Электропроводность, температура и распределение водных масс в Горьковском и Куйбышевском водохранилищах. Матер. Первого и техн. совещ. по изуч. Куйбышев. водохр., вып. 1, Куйбышев.
- Рутковский В. И. 1964. Опыт применения скоростной съемки температуры и электропроводности для изучения температурного режима и перемещения водных масс в водохранилищах. В сб.: Методы изуч. и использов. водн. ресурсов, изд. «Наука», М.
- Рутковский В. И. и Курдина Т. Н. 1959. Водный баланс Рыбинского водохранилища за период с 1947 по 1955 г. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 1 (4), Изд. АН СССР, М.—Л.
- Рыбинское водохранилище. 1953. Изменение природы побережий водохранилища. Сб. статей МОИП, ч. 1, М.
- Рыбопромышленный атлас Рыбинского водохранилища. 1963. Ярославль.
- Самойленко В. С. 1965. О реальности воздушных и водных масс. Океанология, т. V, вып. 1.

- Себенцев Б. М., Биск Д. И., Мейснер Е. В. 1940. Зимний режим водохранилища канала Москва—Волга (в пределах Московской области). Тр. Воронежск. отд. Всерос. н.-иссл. инст. прудового рыбн. хоз., т. III, вып. 1. Воронеж.
- Себенцев Б. М. и Мейснер Е. В. 1947. Рыбоводно-биологические обследования рыбохозяйственного освоения Угличского водохранилища. Тр. Всерос. н.-иссл. инст. прудового рыбн. хоз., т. IV.
- Селюк Е. М. 1959. Расчет высоты волны и задачи натурных исследований волнения на водохранилищах. Тр. III Всесоюзн. гидрол. съезда, т. IV, Гидрометеиздат, Л.
- Семенов-Тянь-Шанский В. П. 1925. Общий характер и географическое значение Поволжья. Поволжье. Путеводитель по Волге, Оке, Каме, Вятке и Белой. Изд. Волжск. Гос. пароходства и транспечати НКПС, Л.
- Сорокин Ю. И. 1958. Первичная продукция органического вещества в водной толще Рыбинского водохранилища. Тр. Биол. ст. «Борок», вып. 3, Изд. АН СССР, М.—Л.
- Степанов В. Н. 1962. Главнейшие специфические черты структуры вод океанов. Океанология, т. II, вып. 1.
- Степанов В. Н. 1965. Основные типы структуры вод Мирового океана. Океанология, т. V, вып. 5.
- Тарвердиев Р. Б. 1963. Некоторые вопросы районирования водохранилищ. Матер. Первого н.-техн. совещ. по изуч. Куйбышевск. водохр., вып. I, Куйбышев.
- Тачалов С. Н. 1957. Методика прогноза ледовых затруднений на Щербаковской ГЭС. Тр. ГГИ, вып. 66, Гидрометеиздат, Л.
- Тачалов С. Н. 1959. Термический режим Рыбинского водохранилища. Сб. работ Рыбинской гидрометеорол. обсерв., вып. 1, Гидрометеиздат, Л.
- Тимофеев В. Т. 1963. Взаимодействие вод Северного Ледовитого океана с водами Атлантического и Тихого океанов. Океанология, т. III, вып. 4.
- Тимофеев В. Т., Панов В. В. 1962. Косвенные методы выделения и анализа водных масс. Гидрометеиздат, Л.
- Толмачев В. А. 1957. Некоторые гидрохимические показатели внутреннего водообмена в Байкале. ДАН СССР, т. 113, № 3.
- Трифонов А. К. 1926. О неоднородности воды р. Камы ниже устья р. Чусовой. Изв. Биол. н.-иссл. инст. и биол. ст. при Пермском гос. ун-в., т. IV, вып. 6, Пермь.
- Трифорова Н. А. 1963. Обмен растворимыми формами азота между грунтом и придонным слоем воды Рыбинского водохранилища. Матер. по биологии и гидрологии волжск. водохр. Изд. АН СССР, М.—Л.
- Тюряков Б. И., Захарченко Н. Е. 1965. Районирование южной половины Северной Атлантики по принципу одинаковости структуры водных масс. Тр. Ленингр. гидрометеорол. инст., вып. 20, сб. 4, Изд. ЛГУ.
- Ушаков П. В. 1949. Система вертикальных зон Охотского моря. ДАН СССР, т. 68, № 4.
- Фелицын Б. И. 1956. Режим уровня при суточном регулировании в нижнем бьефе Щербаковской ГЭС. Метеорология и гидрология, № 1.
- Фомичев А. В. 1965. Водные массы и вертикальная структура антарктических вод. Тр. Всесоюзн. н.-иссл. инст. морск. рыбн. хоз. и океаногр., т. 57, сб. II, Пищепромиздат, М.
- Фортунатов М. А. 1958. Опыт применения самолета и вертолета для изучения Рыбинского водохранилища. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 2.
- Фортунатов М. А. 1959. Цветность и прозрачность воды Рыбинского водохранилища как показатели его режима. Тр. Инст. биол. водохр. АН СССР, вып. 2 (5), Изд. АН СССР, М.—Л.
- Фортунатов М. А. 1963. Проблема сооружения водохранилищ и предварительные итоги их учета в различных частях света. Матер. Первого н.-техн. совещ. по изуч. Куйбышев. водохр., вып. I. Куйбышев.
- Хайайченко Н. К. 1947. О видах трансформации водных масс. Метеорология и гидрология, № 1.
- Чигиринский П. Ф. 1962. О течениях в Куйбышевском водохранилище на основании четырехлетних наблюдений. Сб. работ Комсомольской гидрометеорол. обсерв., вып. II, Куйбышев.
- Чигиринский П. Ф. 1966. Сточное течение в Куйбышевском водохранилище по данным съемок 1963 и 1964 гг. Сб. работ Комсомольской гидрометеорол. обсерв., вып. 7, Гидрометеиздат, Л.
- Чижиков Н. В. 1928. Река Молога и ее геологическое прошлое. Тр. Второй губерн. конфер. по изуч. производ. сил Ярославск. губ. Ярославль.
- Шамов Г. И. 1959. Речные наносы. Изд. 2, испр. и доп. Гидрометеиздат, Л.
- Широкое В. М. 1959. Вопросы закосимости устьев малых рек Куйбышевского водохранилища. Тр. Казанск. фил. АН СССР, сер. энергет. и водн. хоз., вып. 4, Казань—Чебоксары.

- Ш и р о к о в В. М. 1961. Некоторые вопросы режима прозрачности и мутности воды Куйбышевского водохранилища. Изв. Казанск. фил. АН СССР, сер. энергет. и водн. хоз., вып. 3.
- Ш и р о к о в В. М. 1962. Режим прозрачности и мутности воды Куйбышевского водохранилища. Сб. работ Комсомольской гидрометеорол. обсерв., вып. II, Куйбышев.
- Ш т о к м а н В. Б. 1940. О турбулентном обмене в средней и южной части Каспийского моря. Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз., № 4.
- Ш т о к м а н В. Б. 1943. О водных массах центральной части Ледовитого океана. Проблемы Арктики, № 2.
- Ш т о к м а н В. Б. 1944. Геометрические свойства σ_t , S -кривых при смешении трех водных масс в неограниченном море. ДАН СССР, т. 13, № 8.
- Ш т о к м а н В. Б. 1953. Влияние рельефа дна и поперечной неравномерности ветра на горизонтальную циркуляцию в мелком море или водохранилище. Метеорология и гидрология, № 8.
- Ш у г а р А. К. 1959. Результаты исследования процесса переработки берегов Горьковского водохранилища в 1956—1958 гг. Тр. совещ. по динамике берегов морей и водохр., т. I, Научн. сообщ., Одесса.
- Ш у л е й к и н В. В. 1953. Физика моря. Изд. 3, перераб. и доп. Изд. АН СССР, М.
- Ш у т о в Д. А. 1926. Наблюдения над колебаниями электропроводности и активной реакции воды р. Волги. Работы Волжск. биол. ст., т. IX, № 1—2, Саратов.
- Щ е р б а к о в А. П. 1939. Основные черты гидрохимического режима Иваньковского водохранилища. Тр. Зоол. инст. АН СССР, т. VII, вып. 1, Изд. АН СССР, М.—Л.
- Щ е р б а к о в А. П. 1941. Основные черты гидрохимического режима Иваньковского водохранилища. Тр. Зоол. инст. АН СССР, т. VII, вып. 1, Изд. АН СССР, М.—Л.
- 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», вып. 1, Изд. АН СССР, М.—Л.
- Щ е р б а к о в А. П. 1953. Продукция органического вещества фитопланктона в Глубоком озере. Тр. Всесоюз. гидробиол. общ., т. V, Изд. АН СССР, М.
- Э д е л ь ш т е й н К. К. 1961. О влиянии уровня Рыбинского водохранилища на стоковые течения Моложского плеса. Бюлл. Инст. биол. водохр. АН СССР, № 11.
- Э д е л ь ш т е й н К. К. 1963а. Измерение скоростей движения воды термогидрометром. В сб.: Матер. по биол. и гидрол. волжск. водохр., Изд. АН СССР, М.—Л.
- Э д е л ь ш т е й н К. К. 1963б. О слое температурного скачка и его динамике в Рыбинском водохранилище. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 6 (9), Изд. АН СССР, М.—Л.
- Э д е л ь ш т е й н К. К. 1963в. Уточнение метода расчета глубинного течения, измеренного двойными поплавками. Метеорология и гидрология, № 10.
- Э д е л ь ш т е й н К. К. 1965а. Водные массы озерной части Горьковского водохранилища. Тр. Инст. биол. внутр. вод АН СССР, вып. 7 (10), изд. «Наука», М.—Л.
- 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. 7 (10), изд. «Наука», М.—Л.
- Э д е л ь ш т е й н К. К. 1968. Формирование, перемещение и трансформация водных масс Горьковского водохранилища. В сб.: Химиям внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения, изд. «Наука», Л.
- Я р о с л а в ц е в Н. А. 1961. Течения и перемещения наносов в прибрежной зоне Горьковского водохранилища. Тр. 7-го Байкальск. научн. координац. совещ. по изуч. берегов водохр., т. 1. М.

- A t k i n s W. R. G., J e n k i n s P. G. 1955. Identification of watermasses by their suspended matter. *Nature*, v. 175, No 4465.
- A y e r s J. C. 1962. Great Lakes waters, their circulation and physical and chemical characteristics. Great Lakes Basin, Washington.
- A y e r s J. 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. Great Lakes Res. Inst., publ. No 3. Univ. of Michigan, Ann. Arbor. Res. Rpt., No 35.
- A y e r s J. C., C h a n d l e r D. C., L a u f f G. H., P o w e r s C. F. and H e n s o n E. B. 1958. Currents and water masses of Lake Michigan. Great Lakes Res. Inst., publ. No 3. Univ. of Michigan, Ann. Arbor. Res. Rpt.
- B a c z y k J. 1966. La differenciation des masses d'eaux, leurs mouvements et les influences atmospheriques dans la Baltique meridionale. *Cahiers oceanogr.*, v. 18, No 9.
- B r y s o n R. A. and S u o m i V. E. 1952. The circulation of Lake Mendota. *Trans. Amer. geophys. Un.*, v. 33.

- Butorin N. V. 1966. Waters of the Rybinsk reservoir, their features and circulation.- In: Symposium of Garda, 9—15 October 1966. Organisé par Decennie hydrologique Internationale et d'UNESCO, vol. I.
- Charnok H. 1962. Water masses of the ocean. WMO Bull., 11, No 1.
- Defant A. 1961. Physical Oceanography. Pergamon Press, Oxford. London—New York—Paris, v. I.
- Gessner Fr. 1960. Limnologische Untersuchungen am Zusammenfluss des Rio Negro und des Amazonas (Solimoes). Int. Rev. der Hydrobiol., Bd. 45, H. 1.
- Groen P. 1961. De wateren van de wereldzee. 2-e dr. Hilversum C. de Boer. Jr. 384 blz.
- Haines D. A. and Bryson R. A. 1961. An empirical study of wind factor in lake Mendota. Limnol. and Oceanogr., vol. 6, № 3.
- Helland-Hansen B. and Hansen F. 1926. The eastern North Atlantic. Geophysische Publikationer, v. 4, № 2, Oslo.
- Helland-Hansen B. 1912. The Ocean Waters. I. Internat. Revue der gesamten Hydrobiol. und Hydrographi., vol. V, Leipzig.
- Helband-Hansen B. 1918. Einige hydrographische Methoden. Versh. 16 Kongr. Scand. Naturf. 1916, Oslo.
- Hopkins T. L. 1961. Natural coloring matter as an indicator of inshore water masses. Limnology and Oceanogr., v. 6, No 4.
- Hydrologie des lacs et des reservoirs. Symposium de Garda, 9—15 octobre 1966, organisé dans le cadre de la Decennie hydrologique internationale avec l'aide de l'Unesco. Vol. I—II, Gentbrugge, Belgique, 1966.
- Hynes H. B. 1967. Man—Made Lakes. Science, v. 156, No 3777.
- Iselin C. O. D. 1936. A study of the circulation of the western North Atlantic. Pap. in Phys. Oceanogr. and Meteorol., v. 4, № 4.
- Jacobsen I. D. 1929. Contribution to the hydrography to the North Atlantic. The Danisch. Exped. 1920—1922, v. 1, No 3, Copenhagen.
- Likens G. E., Ragotzkie R. A. 1965. Vertical water motions in a small icecovered lake. J. Geophys. Res., 70, № 10.
- Man-Made Lakes. 1966. Proceedings of a Symposium heldt at the Koyal Geographical Society, London on 30 September and 1 October, 1965, Edited by R. H. Lowe—M. Connel Academic Press. London and New York.
- Montgomery R. B. 1958. Water characteristics of Atlantic Ocean and of world ocean. Deep—Sea Res., v. 5, No 2.
- Morton F. I., Rosenberg H. B. 1959. Hydrology of Lake Ontario. J. Hydraul. Div. Proc. Amer. Soc. Civil. Eng., 85, No 5.
- Old A. H. 1962. The Vianamatta shale waters of the Sydney district, their salinity and a suggested geological explanation. 2-nd ed. Sydney. Dept. Agric., Chem. Branch, Div. Sci. Serv.
- Prausnitz W. 1908. Über «natürliche Filtration» des Bodens. Zeitschrift für Hygiene und Infektions., Bd. 59. Leipzig.
- Ragotzkie R. and Bratnick M. 1965. Infrared temperature patterns on Lake Superior and inferred vertical motions. Great. Lakes Res. Inst., publ. № 13. Univ. of Michigan, Ann. Arbor.
- Ramasastri A. A. 1959. Water masses and the frequency of sea water characteristics in the upper layers of the south eastern Arabian Sea. J. Marine Biol. Assoc. India, v. 1, № 2.
- Rochford A. C. 1942. Characteristics and flow paths of the intermediate depth waters of the south-east Indian Ocean. J. Marine Res., v. 17.
- Rochford D. J. 1964. Hydrology of the Indian Ocean. III. Water masses of the upper 500 metres of the south-east Indian Ocean. Austral. J. Marine and Freshwater Res., v. 15, № 1.
- Rochford D. J. 1966. Distribution of Banda intermediate water in the Indian Ocean. Austral. J. Marine and Freshwater Res., v. 17, № 1.
- Rotschi M. H. 1963. Sur les flux d'eau en mer de Corail entre la Nouvelle-Caledonie et Norfolk. Comptes rendus. Acad. Sci., 256, № 11.
- Sauberer F. 1939. Beiträge zur Kenntnis des Lichtklimas einiger Alpenseen. Int. Rev. ges Hydrobiol., Bd. 39, H. 1/2.
- Sauberer F., Ruttner Fr. 1941. Die Strahlungsverhältnisse der Binnengewässer. Leipzig.
- Schmalz J. 1932. Die Oberflächen und Tiefenströme des Bodensees. III. Der Weg des Rheinwassers im Bodensee. Schr. der Ver. Leells. Bodensees, 60.
- Schräder T. 1956. Talsperren. Urania, H. 2.
- Sokal R. R., Sneath. 1963. Principles of Numerical Taxonomy. London.
- Spitta und Pleissner. 1909. Neue Hilfsmittel für die hygienische Beurteilung und Kontrolle von Wässern. Arbeiten aus dem Kaiserlichen Gesundheitsamte. Bd. 30. Berlin.
- Stefansson U. 1962. North icelandic waters. Rit. fiskideildar, № 3.
- Stockman W. B. 1946. A theory of T—S curves as a method for studying the mixing of water masses in the sea. Journ. Mar. Res., vol. 6, No 1.

- Stommel H. 1963. Varieties of oceanographic experience. *Science*, v. 139, No 3555.
- Sverdrup H. U., Johnson M. W. and Fleming R. H. 1942. *The Oceans*. Prentice-Hall, Inc. New York.
- Thomas N. O. and Harbeck G. E. 1956. Reservoirs in the United States. Geological Survey water-supply, paper 1360—A. Washington.
- Thomsen H. 1935. Entstehung und Verbreitung einiger charakteristischer Wassermassen in dem Indischen und südlichen Pazifischen Ozean. *Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie*. Bd. 63, H. VIII. Berlin.
- Wüst G. 1935. Schichtung und Zirkulation des Atlantischen Ozeans. Das Bodenwasser und die Stratosphäre. Deutsche Atlantische Exped. «Meteor» 1925—27. *Wiss. Ergebn.* Bd. VI, Teil I, Lief. 2. Berlin und Leipzig.
- Wüst G. 1965. Zur Frage stationärer Verhältnisse in der Makrostruktur der Kaltwassersphäre des Atlantischen Ozeans. *Kieler Meeresforschungen*, Bd. XXI, H. 1.
- Wyrtki K. 1962. The subsurface water masses in the western South Pacific Ocean. *Austral. J. Marine and Freshwater Res.*, v. 13, № 1.
- Zore-Armanda M. 1963. Mixing of three water types in the South Adriatic. *Rapp. et. proc.—verb. reun. Commiss. internat. explorat. scient. Mer. mediterr.*, 17, № 3.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Предисловие	3
В в е д е н и е	5
Общие сведения о водохранилищах	5
Краткий исторический обзор исследований водохранилищ волжского каскада	7
Материалы и методика	16
Часть I. Гидрологические процессы в водохранилищах волжского каскада	
Г л а в а I. Общие сведения о водохранилищах волжского каскада	25
Краткая физико-географическая характеристика водосбора волжских водохранилищ	25
Географическое положение и параметры волжских водохранилищ	35
Особенности морфометрии и грунтов волжских водохранилищ	49
Г л а в а II. Гидрологические процессы в водохранилищах волжского каскада.	62
Водный баланс водохранилищ	62
Уровень водохранилищ	74
Волновые процессы в водохранилищах	86
Течения в водохранилищах	90
Температурный режим водохранилищ	130
Особенности развития гидрологических процессов в годовом цикле	153
Часть II. Формирование и динамика водных масс в водохранилищах волжского каскада	
Г л а в а III. Основные показатели и методы выделения водных масс в пресных водоемах	170
Определение понятия «водная масса»	170
Показатели водных масс пресных водоемов	176
Физические показатели	176
Химические показатели	177
Сезонная изменчивость показателей водных масс водохранилищ	181
Методы выделения водных масс в волжских водохранилищах	187
Г л а в а IV. Формирование водных масс в водохранилищах различного типа	212
Иваньковское и Угличское водохранилища	213
Шекснинское водохранилище	216
Рыбинское водохранилище	218
Горьковское водохранилище	227
Куйбышевское водохранилище	236
Волгоградское водохранилище	244
Г л а в а V. Анализ водных масс в водохранилищах волжского каскада	245
Распределение водных масс в водохранилищах различного типа	245
Вертикальная структура водных масс	252
Сезонная динамика водных масс	263
Г л а в а VI. Перемещение и трансформация водных масс в водохранилищах волжского каскада	268
О втекании исходных водных масс в водохранилище	268
Особенности перемещения водных масс в водохранилищах различного типа	271
О факторах и механизме трансформации водных масс в водохранилищах	285
Роль перемешивания в трансформации водных масс водохранилищ	291
Трансформация вод Волги в каскаде водохранилищ	300
Заключение	306
Summary	308
Литература	309

- Stommel H. 1963. Varieties of oceanographic experience. *Science*, v. 139, No 3555.
- Sverdrup H. U., Johnson M. W. and Fleming R. H. 1942. *The Oceans*. Prentice-Hall, Inc. New York.
- Thomas N. O. and Harbeck G. E. 1956. Reservoirs in the United States. Geological Survey water-supply, paper 1360—A. Washington.
- Thomsen H. 1935. Entstehung und Verbreitung einiger charakteristischer Wassermassen in dem Indischen und südlichen Pazifischen Ozean. *Annalen der Hydrographie und Maritimen Meteorologie*. Bd. 63, H. VIII. Berlin.
- Wüst G. 1935. Schichtung und Zirkulation des Atlantischen Ozeans. Das Bodenwasser und die Stratosphäre. Deutsche Atlantische Exped. «Meteor» 1925—27. *Wiss. Ergebn.* Bd. VI, Teil I, Lief. 2. Berlin und Leipzig.
- Wüst G. 1965. Zur Frage stationärer Verhältnisse in der Makrostruktur der Kaltwassersphäre des Atlantischen Ozeans. *Kieler Meeresforschungen*, Bd. XXI, H. 1.
- Wyrtki K. 1962. The subsurface water masses in the western South Pacific Ocean. *Austral. J. Marine and Freshwater Res.*, v. 13, № 1.
- Zore-Armanda M. 1963. Mixing of three water types in the South Adriatic. *Rapp. et. proc.—verb. reun. Commiss. internat. explorat. scient. Mer. mediterr.*, 17, № 3.

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
Предисловие	3
В в е д е н и е	5
Общие сведения о водохранилищах	5
Краткий исторический обзор исследований водохранилищ волжского каскада	7
Материалы и методика	16
Ч а с т ь I. Гидрологические процессы в водохранилищах волжского каскада	
Г л а в а I. Общие сведения о водохранилищах волжского каскада	25
Краткая физико-географическая характеристика водосбора волжских водохранилищ	25
Географическое положение и параметры волжских водохранилищ	35
Особенности морфометрии и грунтов волжских водохранилищ	49
Г л а в а II. Гидрологические процессы в водохранилищах волжского каскада.	62
Водный баланс водохранилищ	62
Уровень водохранилищ	74
Волновые процессы в водохранилищах	86
Течения в водохранилищах	90
Температурный режим водохранилищ	130
Особенности развития гидрологических процессов в годовом цикле	153
Ч а с т ь II. Формирование и динамика водных масс в водохранилищах волжского каскада	
Г л а в а III. Основные показатели и методы выделения водных масс в пресных водоемах	170
Определение понятия «водная масса»	170
Показатели водных масс пресных водоемов	176
Физические показатели	176
Химические показатели	177
Сезонная изменчивость показателей водных масс водохранилищ	181
Методы выделения водных масс в волжских водохранилищах	187
Г л а в а IV. Формирование водных масс в водохранилищах различного типа	212
Иваньковское и Угличское водохранилища	213
Шекснинское водохранилище	216
Рыбинское водохранилище	218
Горьковское водохранилище	227
Куйбышевское водохранилище	236
Волгоградское водохранилище	244
Г л а в а V. Анализ водных масс в водохранилищах волжского каскада	245
Распределение водных масс в водохранилищах различного типа	245
Вертикальная структура водных масс	252
Сезонная динамика водных масс	263
Г л а в а VI. Перемещение и трансформация водных масс в водохранилищах волжского каскада	268
О втекании исходных водных масс в водохранилище	268
Особенности перемещения водных масс в водохранилищах различного типа	271
О факторах и механизме трансформации водных масс в водохранилищах	285
Роль перемешивания в трансформации водных масс водохранилищ	291
Трансформация вод Волги в каскаде водохранилищ	300
Заключение	306
Summary	308
Литература	308

CONTENTS

	Page
Preface	3
Introduction	5
General knowledge on reservoirs	5
Brief historical survey of investigations of the Volga cascade reservoirs	7
Materials and methods	16
Part I. Hydrological processes in reservoirs of the Volga cascade	
Chapter I. General knowledge on reservoirs of the Volga cascade	25
Brief physico-geographical characteristics of the Volga reservoirs watershed	25
Geographical situation and parameters of the Volga reservoirs	35
Morphometry and grounds of the Volga reservoirs	49
Chapter II. Hydrological processes in reservoirs of the Volga cascade	62
Water balance of the reservoirs	62
Level of the reservoirs	74
Wave actions in the reservoirs	86
Currents of the reservoirs	90
Temperatures regime of the reservoirs	130
Features of hydrological processes development in the cycle of fluctuation	153
Part II. Formation and dynamics of water masses in reservoirs of the Volga cascade	
Chapter III. Main indices and methods of water masses distinguishing in fresh—water bodies	170
Definition of the concept «water mass»	170
Indices of water masses of the fresh water reservoirs	176
Physical indices	176
Chemical indices	177
Seasonal variations of water masses indices of the reservoirs	181
Methods of water masses distinguishing in the Volga reservoirs	187
Chapter IV. Formation of water masses in the reservoirs of different types	212
The Ivankovo and the Uglitch reservoirs	213
The Sheksninsk reservoir	216
The Rybinsk reservoir	218
The Gorky reservoir	227
The Kujbyshev reservoir	236
The Volgograd reservoir	244
Chapter V. Analysis of water masses in reservoirs of the Volga cascade	245
Distribution of water masses in reservoirs of different types	245
Vertical structure of water masses	252
Seasonal dynamics of water masses	263
Chapter VI. Transference and transformation of water masses in the Volga cascade reservoirs	268
On flowing of initial water masses into reservoir	268
Peculiarities of water masses transference in reservoirs of different types	271
On the factors and mechanism of water masses transformation in reservoirs	285
Role of mixing in transformation of reservoirs water masses	291
Transformation of the Volga waters in the reservoirs cascade	300
Conclusion	306
Summary	308
Literature cited	309

Николай Васильевич Буторин
ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
И ДИНАМИКА ВОДНЫХ МАСС
В ВОДОХРАНИЛИЩАХ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА

Утверждено к печати
Институтом биологии внутренних вод АН СССР

Редактор издательства Г. Л. Кирикова
Художник Д. С. Данилов
Технический редактор А. П. Чистякова
Корректоры Г. Н. Атлас и Э. Н. Липпа

Сдано в набор 29 V 1969 г. Подписано и печати
23/IX 1969 г. РИСО АН СССР № 3-93В. Формат бу-
маги $70 \times 108^{1/16}$. Бум. л. $10^{9/16}$. Печ. л. $20^{1/4} + 3$ вкл.
($^{7/8}$ печ. л.) = 29.57 усл. печ. л. Уч.-изд. л. 29.08.
Изд. № 3861. Тип. зак. № 248. М-13258. Тираж 1000.
Бумага № 1. Цена 3 р. 11 к.

Ленинградское отделение издательства «Наука»
Ленинград, В-164, Менделеевская лин., д. 1

1-я тип. издательства «Наука». Ленинград, В-34,
9 линия, д. 12

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

**В магазинах конторы «Академкнига»
имеются в наличии книги:**

Берега Куйбышевского водохранилища. (Опыт применения материалов аэрофотосъемки при комплексном изучении Куйбышевского водохранилища). 1962. 190 стр. Цена 1 р. 61 к.

Вельмина Н. А., Узембло В. В. Гидрогеология центральной части Южной Якутии. (Совет по изучению производительных сил. Ин-т Мерзлотовед. им. В. А. Обручева). 1959. 179 стр. Цена 1 р. 40 к.

Минеральные воды южной части Восточной Сибири. (Сиб. отд-ние, Вост.-Сиб. геол. ин-т).

Т. 1. Гидрогеология минеральных вод и их народнохозяйственное значение. 1961. 346 стр. Цена 3 р. 26 к.

Т. 2. Минеральные источники, скважины, вскрывающие минеральные воды и минеральные озера. 1962. 200 стр. Цена 1 р. 98 к.

Общие вопросы карстоведения. Сборник. (Лабора- т. геол. проблем им. Ф. П. Саваренского). 1962. 248 стр. Цена 1 р. 45 к.

Павловский Н. Н. Собрание сочинений. В двух томах (АН СССР). Т. 2. Движение грунтовых вод. 1956. 771 стр. Цена 4 р. 86 к.

Тагеева Н. В., Тихомирова М. М. Геохимия паровых вод при диа- генезе морских осадков (на примере Каспийского моря). (Лабора- тория гидрогеологических проблем им. Ф. П. Саваренского). 1962. 247 стр. Цена 1 р. 56 к.

Тимофеев Д. А. Средняя и Нижняя Олекма. Геоморфологический анализ территории бассейна. 1965. 138 стр. Цена 88 к.

Шарков В. В. Геология подводного склона западного берега Каспийского моря от Махачкалы до устья реки Куры. 1964. 430 стр. Цена 3 р. 10 к.

Для получения книг почтой заказы просим направлять по адресу:
Москва, В-463, Мичуринский пр., 12, магазин «Книга — почтой»
Центральной конторы «Академкнига».

Ленинград, Д-120, Литейный пр., 57, «Академкнига», магазин
Книга — почтой».