

А. С. Литвинов

ЭНЕРГО- И МАССООБМЕН В ВОДОХРАНИЛИЩАХ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА



**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ВНУТРЕННИХ ВОД
им. И.Д.ПАПАНИНА**

А.С. Литвинов

**ЭНЕРГО– И МАССООБМЕН В ВОДОХРАНИЛИЩАХ
ВОЛЖСКОГО КАСКАДА**

A.S.LITVINOV

Energy and Mass Exchange in Reservoirs of the Volga River

The book deals with characteristics of energy and mass exchange processes in reservoirs of the Volga river. Special emphasis is put on Long-term and seasonal fluctuations of water balance and water exchange components in the reservoirs, spatial and seasonal variability of fields of hydrophysical characteristics. On the basis of mathematical modeling of currents a method for inner water exchange calculation has been evolved. The role of hydrological processes in hydrobiota distribution and water quality is discussed. It is suggested to use the reaction of the most labile part of biota for ecological assessment of water quality in areas of industrial wastewater discharge.

УДК 556.55(47)

ББК 26.222.6

Л 64

Литвинов А.С.

**Л 64 Энерго- и массообмен в водохранилищах Волжского каскада:
Монография – Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2000. – 83 с.
ISBN 5-230-18412-4**

В книге рассмотрены характеристики процессов энерго- и массообмена в водохранилищах Волжского каскада. Основное внимание уделено многолетним и сезонным колебаниям составляющих водного баланса и водообмена в водохранилищах, установлению закономерностей формирования, пространственной и временной изменчивости полей гидрофизических характеристик. На основании математического моделирования течений предложен метод расчета внутреннего водообмена. Обсуждается роль гидрологических процессов в распределении гидробионтов и формировании качества воды. Для оценки качества водной среды с экологических позиций в районах сброса сточных вод промышленных центров предлагается использовать реакцию наиболее лабильной части биоты.

Книга рассчитана на экологов, географов, гидрологов и специалистов в области охраны и использования водных ресурсов.

Табл. 9. Ил. 25. Библиогр. 83.

УДК 556.55(47)

ББК 26.222.6

Рецензенты: Действительный член Академии водохозяйственных наук, доктор технических наук А.Е.Асарин, доктор географических наук, профессор К.К.Эдельштейн.

Книга подготовлена и издана при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Грант 98-05-64839).

ISBN 5-230-18412-4

© Литвинов А.С., 2000

Оформление, Ярославский государственный

технический университет, 2000

Одним из ведущих факторов изменения окружающей среды за последние десятилетия служат водохранилища. В настоящее время в бассейне р. Волги создано 12 водохранилищ (объемом свыше 1 км^3) суммарной площадью свыше 23000 км^2 и полным объемом 168 км^3 (табл. 1). Такие крупномасштабные преобразования коренным образом изменили режим континентального звена глобального круговорота воды и содержащихся в ней веществ. Изменения в естественном гидрологическом цикле речных систем или отдельных их частях коснулись в первую очередь общего процесса стока, водного баланса и водообмена, режима уровней, течений, термики, т.е. характеристик, определяющих их энерго- и массообмен. Перестройка процессов энерго- и массообмена в руслах и долинах рек в сочетании с интенсификацией хозяйственной деятельности в их бассейнах повлияли на функционирование речных экосистем и привели к изменению экологического потенциала и качества природных вод. Для предотвращения или смягчения экологического кризиса, который может возникнуть при нарушениях природной среды, обусловленных хозяйственной деятельностью, необходимо определить допустимые пределы антропогенного преобразования энерго- и массообмена в экосистемах и установить стратегию природопользования, при которой обеспечивается продолжительное и устойчивое их существование.

Решение этих задач возможно при детальном исследовании многолетних и сезонных колебаний составляющих водного баланса водохранилищ, выяснении особенностей и изменчивости их внешнего и внутреннего водообмена, закономерностей формирования полей гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических характеристик, их временной и пространственной изменчивости, охватывающей самый широкий диапазон масштабов, оценке роли гидрологических процессов в распределении гидробионтов и формировании качества воды.

Материалы и методика

В основу работы положены исследования автора, проведенные на водохранилищах Волжского каскада, водоемах Северо-Двинской системы, озерах Плещеево и Неро в 1962–1998 годы, как в навигационный период с экспедиционных судов, так

Таблица 1. Основные морфометрические показатели водохранилищ Волго-Камского каскада по [1, 10]

Водохранилище	Годы заполнения	Объем, км ³		Площадь зеркала, км ²	Длина, км	Ширина наибольшая, км	Средняя глубина, м
		полный	полезный				
Иваньковское	1937	1.12	0.81	327	120	8.0	3.4
Угличское	1939-1943	1.25	0.81	249	143	5.0	5.0
Рыбинское	1940-1949	25.42	16.67	4 550	250	56.0	5.6
Горьковское	1955-1957	8.82	3.90	1 591	430	15.0	6.1
Чебоксарское *	1981	4.60 12.60	0 5.40	1 080 2 170	321 321	– 16.0	4.2 5.8
Куйбышевское	1955-1957	57.30	33.90	6 150	484	27.0	8.9
Саратовское	1967-1968	12.87	1.75	1 831	348	20.0	7.3
Волгоградское	1958-1960	31.45	8.25	3 117	546	17.0	10.1
Камское	1954-1956	12.2	9.8	1 915	272	13.5	6.4
Воткинское	1961-1964	9.4	3.7	1 065	365	9.0	8.4
Нижнекамское *	1978	2.8 13.8	0 4.60	1 000 2 570	300 300	– 20.0	2.8 5.4
Итого (округлено)		168	80	23 060			
Примечание		187	90	25 720			

* В числителе – при современном подпорном уровне, в знаменателе – при проектном НПУ

и в период ледостава. За отмеченный промежуток времени на водохранилищах Волжского каскада было установлено свыше 150 автономных буйковых станций (АБС) с самописцами течений типа БПВ и АЦИТ с дискретностью наблюдений от 5 мин. до 1 часа и продолжительностью регистрации в зимний период до 90 суток. Эти материалы позволили исследовать влияние попусков воды через ГЭС на режим течений и их спектральную структуру в диапазонах мезо- и крупных масштабов (от нескольких часов до нескольких суток).

Для изучения временной и пространственной изменчивости полей гидрологических характеристик в водохранилищах были разработаны и изготовлены в мастерских ИБВВ РАН различные автоматизированные комплексы, работающие в буксируемом и зондирующем режимах и организованы экспериментальные квазисинхронные исследования в виде экспресс-съемок водоемов, а также отдельных гидрологических полигонов на Рыбинском, Ивановском, Чебоксарском, Куйбышевском и Волгоградском водохранилищах с записью температуры и электропроводности воды в поверхностном слое и вертикальным зондированием водной массы по специально разработанной сетке станций [30, 37, 58, 74]. На Рыбинском, Ивановском и Куйбышевском водохранилищах выполнялись наблюдения на многосуточных станциях с непрерывной регистрацией температуры воды на нескольких горизонтах приборами типа "термокосы" и периодическим зондированием (через 3 часа) по вертикали температуры и электропроводности. Большинство экспедиций носило комплексный характер и в работах принимали участие гидрохимики, гидробиологи, микробиологи, в отдельных экспедициях ихтиологи. Такой комплекс позволил впоследствии выполнить оценку роли гидрологических параметров в распределении гидробионтов и формировании качества воды.

Для оценки возможности использования методов математической статистики в целях акваториального районирования на Ивановском водохранилище весной, летом и осенью были проведены специальные наблюдения на 32 станциях с измерением от 39 до 59 различных гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических параметров [54]. В 1986–1990 гг. на Рыбинском

водохранилище выполнялись комплексные многоуровневые исследования для изучения динамики вод и оценки влияния гидрофизических процессов на распределение химико-биологических характеристик с использованием информации, полученной с искусственных спутников Земли (ИСЗ), самолета-лаборатории, судов и автономных буйковых станций.

Математическое моделирование течений проводилось на Ивановском, Рыбинском, Горьковском и Куйбышевском водохранилищах. Расчеты выполнялись для преобладающих направлений ветра и характерных для различных сезонов величин притока и стока, а для Рыбинского водохранилища и для экстремальных по водности лет. При работах на полигонах расчеты полей течений выполнялись для конкретных гидрометеорологических условий, наблюдающихся в период исследований.

В работе также использованы данные регулярных наблюдений на сети Гидрометеослужбы, опубликованные в "Гидрологических ежегодниках" и "Материалах наблюдений на озерах и водохранилищах" за период с 1947 по 1986 гг. [16, 62, 63].

Автор выражает глубокую благодарность доктору технических наук А.Е.Асарину и доктору географических наук, профессору К.К.Эдельштейну за рецензирование рукописи и ценные замечания, сделанные в процессе ее подготовки, а также сотрудникам лаборатории гидрологии и гидрохимии ИБВВ РАН, принимавшим участие в сборе и обработке полевых материалов и подготовке рукописи.

Глава 1. ВОДНЫЙ БАЛАНС И ВОДООБМЕН ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА

Водный баланс – одна из основных гидрологических характеристик водоема. Он отражает совокупное воздействие факторов, обусловленных колебаниями климата и антропогенной деятельностью на водосборе, является основой для выполнения всех видов исследований, связанных с особенностями формирования и динамики водных масс, гидрохимического и гидробиологического режима водоемов. Другой важнейшей характеристикой водохранилищ, обуславливающей интенсивность происходящих в них процессов, является их водообмен. В работе исследованы многолет-

ние и сезонные колебания составляющих водного баланса и водообмена за период с момента создания водохранилищ или с начала их нормальной эксплуатации по 1990 год включительно. Методики и точность определения отдельных составляющих баланса приведены в ряде работ [13, 14] и здесь не рассматриваются.

1.1. Многолетние изменения составляющих водного баланса

Основную роль в приходной части водных балансов всех Волжских водохранилищ играет поверхностный приток, дающий от 99.6 % (Саратовское водохранилище) до 93.6 % (Рыбинское водохранилище). В расходной части сток через плотину и ГЭС составляет от 99.6 % в Саратовском водохранилище до 78.6 % в Ивановском (19.6 % расходной части забирается в канал им. Москвы). Количество осадков на поверхность водохранилищ и испарение с нее в годовых балансах различается незначительно, определяется их площадями и климатическими условиями, изменяясь от 0.4 до 6.4 % (табл. 1.1).

Межгодовая изменчивость элементов водного баланса Волжских водохранилищ велика. Для водохранилищ Верхней Волги (Ивановское, Угличское, Рыбинское) поверхностный приток за исследованный период изменялся в 3.4–4.2 раза, Средней Волги (Горьковское, Чебоксарское, Куйбышевское) в 1.5–2.4 раза и Нижней Волги (Саратовское, Волгоградское) в 2 раза. Значительно меньшие колебания притока в водохранилищах Средней и Нижней Волги обусловлены зарегулированностью стока водохранилищами Верхней Волги и Камы. Осадки на зеркало водохранилищ и испарение с их поверхности в многолетнем плане изменяются в 1.9–3.0 раза в водохранилищах Верхней Волги и 3.5–5.5 раза на Средней и Нижней Волге [49, 51, 53, 68].

Исследованиями многих авторов [15, 20, 70] установлено наличие внутривековых циклов в колебаниях общей увлажненности над территорией Евразии с периодами от 19 до 33 лет и обусловленного ими изменения в стоке рек. Каждый из таких циклов включает многоводную и маловодную фазу.

Анализ изменчивости приходных и расходных частей водного баланса волжских водохранилищ показал, что за исследуемый пе-

риод наблюдалось три фазы водности – многоводная (1951–1962 гг.), маловодная (1963–1976 гг.) и вновь многоводная (1977–1990 гг.). В периоды многоводной фазы объем притока и сброса воды из водохранилищ в подавляющем большинстве лет превышал среднюю многолетнюю величину, а в период маловодной – был ниже средней многолетней (рис. 1.1).

Учитывая высокую согласованность и слабую пространственную изменчивость в колебаниях стока рек бассейна Верхней Волги [22], мы проследили за изменениями расходов воды в бассейне по суммарной приточности в Рыбинское водохранилище за период с 1890 г. Анализ этих данных показал: 1) наполнение Верхневолжских водохранилищ осуществлялось в маловодную фазу в бассейне, что сказалось на длительности наполнения Рыбинского водохранилища (1941–1947 гг.); 2) минимум притока в 1972–1973 гг. был одним из самых глубоких за последние 100 лет, а его максимум 1990 г. – самым высоким.

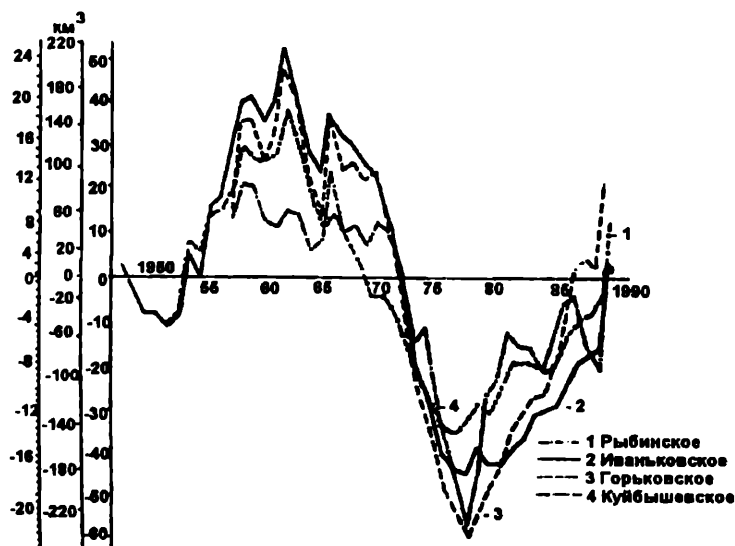


Рис. 1.1. Разностные интегральные кривые притока в Рыбинское (1), Ивановское (2), Горьковское (3) и Куйбышевское (4) водохранилища

Таблица 1.1. Средний многолетний водный баланс водохранилищ Волги (км³ – над чертой, под чертой – проценты)

Водохранилище	Составляющие баланса						
	Приход			Расход			
	Приток	Осадки	Σ	Пределы изменений	Сток	Испарение	Σ
Иванковское 1951–1990	10.07 98.1	0.19 1.9	10.26 100	4.94–17.90	10.09 98.3	0.17 1.7	10.26 100
Угличское 1948–1990	11.46 98.7	0.15 1.3	11.61 100	5.35–22.00	11.47 98.8	0.14 1.2	11.61 100
Рыбинское 1947–1991	33.10 93.6	2.26 6.4	35.36 100	17.45–56.62	33.30 94.2	2.06 5.8	35.36 100
Горьковское 1957–1990	49.53 98.1	0.95 1.9	50.48 100	26.92–69.03	49.57 98.2	0.91 1.8	50.48 100
Чебоксарское 1981–1990	118.89 99.5	0.61 0.5	119.50 100	98.89–146.54	118.78 99.4	0.72 0.6	119.50 100
Куйбышевское 1957–1991	244.3 98.8	2.92 1.2	247.22 100	160.60–353.81	243.86 98.6	3.36 1.4	247.22 100
Саратовское 1969–1990	248.3 99.6	0.98 0.4	249.28 100	170.16–342.82	247.96 99.5	1.31 0.5	249.28 100
Волгоградское 1962–1990	259.2 99.5	1.24 0.5	260.44 100	164.3–337.3	258.98 99.4	1.46 0.6	260.44 100
							168.7–335.2

Наличие различных фаз водности в многолетнем ряду притока вод в Рыбинское водохранилище говорит о его нестационарности, обусловленной естественными факторами. При этом, если за весь исследуемый период значительного направленного линейного тренда практически не выявлено, то за отдельные фазы водности вклад линейного тренда в общую величину дисперсии достигал значительных величин (табл. 1.2).

Таблица 1.2. Характеристики линейного тренда средних значений притока и сброса воды из Рыбинского водохранилища (b - коэффициент регрессии, R - коэффициент корреляции)

Расчетный период	Критерии тренда					
	приток			сброс		
	b	R	R ² , %	b	R	R ² , %
1890-1990	0.022	0.081	0.66	-0.022	-0.080	0.64
1900-1947	-0.197	-0.369	13.6	-	-	-
1947-1990	-0.01	-0.016	0.03	-0.061	-0.101	1.03
1940-1962	0.824	0.652	42.5	0.791	0.651	42.4
1963-1976	-0.458	-0.248	6.2	-0.423	-0.217	4.7
1977-1990	0.615	1.44	19.4	0.355	0.379	14.4

Более длительный анализ колебаний стока рек бассейна Верхней Волги свидетельствует о том, что по всему бассейну одновременно в течение ряда лет многоводными были только 1955–58 гг., а маловодными 1971–1975 гг. В промежуточные между названными годы, в условиях общей тенденции падения расходов наблюдались, во-первых, отдельные нарушения в согласованности колебаний стока, т.е. повышение расходов на одних реках могло сопровождаться их падением на других; во-вторых, колебание расходов около нормы, в третьих, среди лет, отнесенных к многоводной фазе, встречались отдельные годы как с низкими расходами воды (1960 г. в районе Молого-Щекснинской низины и боковые притоки Горьковского водохранилища), так и с высокими расходами воды в маловодную фазу (1966 г. по рекам всего бассейна).

Отмеченная несогласованность в изменениях среднегодовых расходов по отдельным рекам бассейна характерна для лет по водности, близких к средним многолетним. Но, как правило, экстремальные годы имеют место только в "своей" фазе.

Сравнение величин составляющих водного баланса за различные фазы водности показывает, что в многоводную фазу приток воды в водохранилища Верхней Волги превышал среднюю многолетнюю величину от 9 до 16 %, в маловодную – был на 16–28 % меньше [68, 83].

Нами также показано, что в различные по водности фазы меняется и вклад отдельных составляющих водного баланса (структура баланса) [59]. Несмотря на то, что осадки и испарение по абсолютной величине изменяются незначительно, для маловодной фазы характерным является повышение их роли в водном балансе (см. табл. 1.2).

1.2. Внутригодовая изменчивость составляющих баланса

Поскольку в общем поступлении воды в водохранилища существенно преобладает поверхностный приток, то он и определяет характер годового изменения приходной части водных балансов.

Наибольший поверхностный приток в водохранилищах Верхней Волги наблюдается в апреле, составляя от 15.9 % в Горьковском до 33 % в Угличском от суммы годового поступления. В водохранилищах Средней и Нижней Волги в мае – от 20 до 23 %. За апрель – май в водохранилища поступает от 30 (Горьковское) до 47.4 % (Рыбинское) годовой величины притока. В июне поступление воды в водохранилища резко сокращается и на протяжении летне-осенних месяцев составляет от 4.1 до 7.3 %. Незначительное увеличение притока в октябре–ноябре, вызываемое осенними дождевыми паводками, сменяется дальнейшим сокращением его объема в зимние месяцы (рис. 1.2).

Ввиду того, что полезный объем водохранилищ Волжского каскада более чем на порядок меньше объема суммарного поступления вод (за исключением Рыбинского и Куйбышевского), наполнение их происходит очень быстро. Практически только в течение одного месяца (апреля) объем притока на 10–28 % превышает объем стока. Это приводит к тому, что уровень воды в них

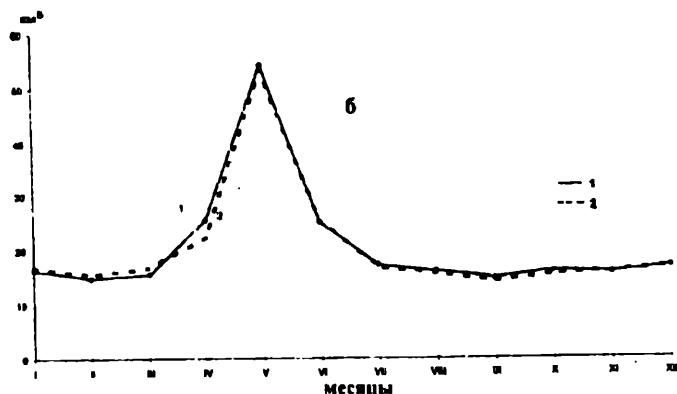
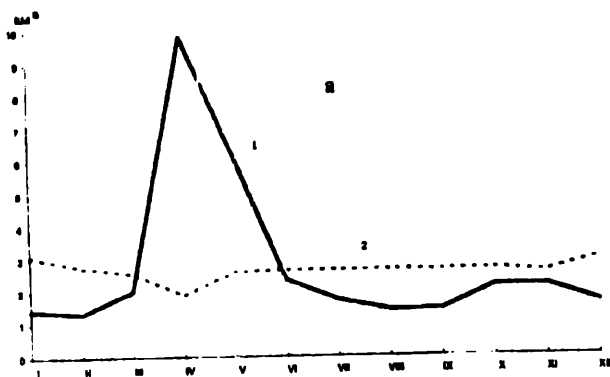


Рис. 1.2. Средний многолетний приток в Рыбинское (а) и Волгоградское (б) водохранилища и сброс: 1 — приток, 2 — сброс

с мая по декабрь поддерживается на отметке, близкой к НПУ. Некоторое увеличение сброса воды отмечается в январе-марте в период зимней и предполоводной сработки. В связи с этим внутригодовое распределение сброса воды аналогично притоку с несколько меньшим объемом в апреле и превышением в январе-марте.

Полезный объем крупнейших в каскаде Рыбинского и Куйбышевского водохранилищ только в 2.1 и 7.1 раза меньше среднеемноголетнего поступления воды. В связи с этим в течение двух месяцев (апреля и мая) приток воды в эти водоемы существенно

превышает сброс (в Рыбинском водохранилище в 2.6 и 5.8 раза соответственно). Во все остальные месяцы сброс воды в нижний бьеф гидроузлов превышает приток (см. рис. 1.2).

Структура приходной части месячных водных балансов в течение года различается незначительно, только для Рыбинского водохранилища доля осадков в приходной части изменяется от 1.3 % в апреле до 19.1 % в июле. Для всех водохранилищ каскада максимальное среднееголетнее месячное количество осадков приходится на июль (от 12 до 15.5 %). Минимальное количество осадков в марте – от 2.1 % на водохранилищах Верхней Волги до 5.5 % на Нижней Волге.

Годовой ход испарения на водохранилищах Верхней Волги имеет четко выраженный максимум в июле, на Средней Волге – августе и на Нижней – августе–сентябре.

1.3. Многолетняя и сезонная изменчивость водообмена водохранилищ Волжского каскада

Интенсивность водообмена – одна из важнейших абиотических характеристик водоема. Различают два вида водообмена – внешний и внутренний. Внешний – при котором воды с присущими им физико–химическими характеристиками поступают в водоемы извне и выходят за их пределы, определяется процессом стока и влагооборота и соответствует водообмену водоема с окружающей средой. Внутренний водообмен отражает перемещение частиц внутри водоема под влиянием течений, вертикального обмена и турбулентного перемешивания. Он характеризует обмен веществом и энергией между различными частями водоема и является одним из факторов, обуславливающих формирование и трансформацию водных масс [21, 71, 72, 73]. Оба типа водообмена тесно взаимосвязаны. Интенсивность внешнего водообмена определяет гидрологические условия возникновения и существования стоковых течений в водоеме, обеспечивающих обмен между участками водохранилища, горизонтальное и вертикальное перемешивание водной массы.

Интегральным показателем интенсивности водообмена служит коэффициент условного водообмена (K_v), который различными авторами [71, 72] определяется по-разному. На наш взгляд,

наиболее адекватно внешний водообмен может быть представлен выражением:

$$K_s = \frac{\Sigma V_{np} + \Sigma V_p}{2W}, \quad (1.1)$$

где ΣV_{np} и ΣV_p – сумма приходных и расходных составляющих водного баланса водоема; W – его средний объем за расчетный промежуток времени (год, месяц). При расчетах месячных коэффициентов водообмена необходим учет всех составляющих водного баланса, поскольку приток в водоем может существенно отличаться от сброса воды, а роль атмосферных осадков и испарения достигать значительной величины. При оценке среднего годового коэффициента водообмена за многолетний период обычно используют уравненные водные балансы. В этом случае $\Sigma V_{np} = \Sigma V_p$ и выражение для расчета коэффициента водообмена упрощается: $K_s = \Sigma V_{np} / W$. Для оценки интенсивности водообмена также используется величина, обратная коэффициенту водообмена $1/K_s$, называемая периодом водообмена, и показывающая, за какой промежуток времени полностью сменяются объемы воды, заполняющие водохранилище.

Поскольку в водохранилищах морфометрические характеристики (уровень, площадь поверхности, объем), а также режим стока зависят не только от природно-климатических условий – рельефа, водности года и др. – но и от антропогенной деятельности (характера регулирования), постольку и водообмен формируется под влиянием этих факторов и не является постоянной величиной (табл. 1.3). При этом большая разница в межгодовых значениях коэффициента водообмена наблюдается в водохранилищах Верхней Волги – Ивановском и Угличском, нежели в Рыбинском и в водохранилищах Средней и Нижней Волги, поскольку они обладают значительно меньшей относительной регулирующей емкостью и колебания стока больше влияют на величину водообмена. С другой стороны, и относительные изменения в объеме стока на Средней и Нижней Волге меньше, чем на Верхней Волге (влияние регулирования стока вышележащими водохранилищами).

В связи со значительной внутригодовой изменчивостью элементов водного баланса водохранилищ, велика и внутригодовая

изменчивость водообмена. В среднем за многолетний период максимальных значений водообмен достигает в апреле, когда он превышает среднюю месячную величину в 2.7–4.6 раза. Это увеличение обусловлено уменьшением объема воды в водохранилищах в результате их зимней сработки и резким увеличением притока в период весеннего половодья [47, 49, 50, 53, 55].

С наполнением водохранилищ и снижением объема притока и сброса их водообмен уменьшается и в течение лета находится на низком уровне с минимумом для всех волжских водохранилищ в августе–сентябре. С октября отмечается некоторое его увеличение, связанное с дождевыми паводками, а затем с началом зимней сработки. Независимо от фаз водности годовой ход K_v имеет однотипный вид, но по абсолютной величине в маловодную фазу K_v в течение всего года меньше соответствующих значений в многоводную (рис.1.3). В многоводные годы за счет обильных дождевых паводков в сентябре–октябре на водохранилищах Верхней Волги водообмен может быть близок к таковому в апреле–мае. Таким образом, полная смена воды в водохранилищах Волжского каскада происходит в среднем за промежуток времени от 0.5 месяца до 2.2 месяца и только в Рыбинском водохранилище несколько больше, чем за 6 месяцев.

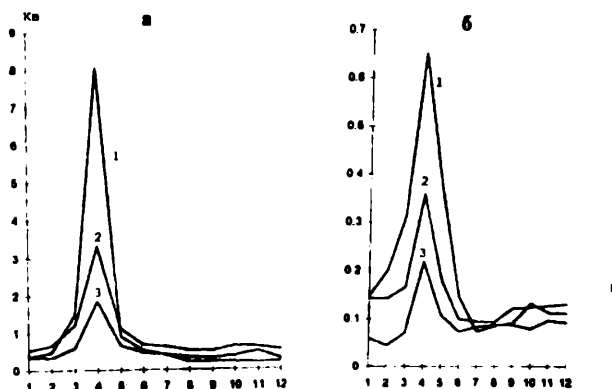


Рис. 1.3. Внутригодовые колебания величины коэффициента водообмена:
 а – в Ивановском водохранилище, б – в Рыбинском водохранилище:
 1 – многоводный (1986 г.); 2 –средний многолетний; 3 –маловодный (1973 г.)

Таблица 1.3. Водообмен водохранилищ Волжского каскада

Водохранилище	Коэффициент водообмена					Период водообмена (месяцы)				
	среднее значение	многоводная фаза	маловодная фаза	многоводный год	маловодный год	среднее значение	многоводная фаза	маловодная фаза	многоводный год	маловодный год
Иваньковское	10.6	12.5	8.3	15.4	6.2	1.1	1.0	1.5	0.8	2.0
Угличское	10.1	11.2	7.3	17.9	4.9	1.2	1.0	1.7	0.7	2.5
Рыбинское	1.9	2.0	1.6	2.3	1.3	6.3	6.0	7.5	5.2	9.2
Горьковское	6.1	6.9	5.0	3.4	3.8	2.0	1.7	2.4	1.4	3.2
Чебоксарское	19.8	—	—	24.3	15.6	0.6	—	—	0.5	0.8
Куйбышевское	5.2	5.7	4.8	6.7	4.1	2.3	2.1	2.5	1.8	2.9
Саратовское	18.2	19.1	16.7	23.8	12.8	0.6	0.6	0.7	0.5	0.9
Волгоградское	8.2	8.7	6.6	10.3	5.4	1.5	1.4	1.8	1.2	2.2

Полученные оценки внешнего водообмена отражают гипотезу вытеснения одних водных масс другими (модель водоема–вытеснителя). При оценке водообмена по модели водоема–смесителя время полной замены “старой” воды на “новую” примерно в три раза больше [71, 72].

Глава 2. СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЙ И ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД В ВОДОХРАНИЛИЩАХ

Движение вод во внутренних водоемах (течения) возникает под одновременным действием ряда разнородных факторов. Однако основными силами, формирующими макроциркуляцию вод, являются градиентные силы (независимо от их происхождения) и касательное напряжение ветра на водную поверхность, а в прибрежных районах и энергия, высвобождающаяся при разрушении волн. Кроме того, на движение масс воды в водоемах оказывают влияние силы инерции, трения, сила Кориолиса и центробежная сила. В водохранилищах из градиентных течений основное значение имеют стоковые. Ветровые течения, как правило, дополняются инерционными (остаточными) перемещениями водных масс, сейшевыми, внутренними волнами. Наличие вертикальной термической стратификации, возникающей в период интенсивного весеннего прогрева, может существенно влиять на структуру циркуляции вод в озеровидных плесах крупных водохранилищ за счет развития плотностных течений. Такой антропогенный фактор как сезонное и внутрисуточное регулирование стока накладывает свой дополнительный отпечаток на течения.

Структура общей горизонтальной циркуляции вод, как главной характеристики гидродинамического режима, во всех водохранилищах Волжского каскада определяется взаимодействием четырех основных факторов: воздействием ветра на водную поверхность, объемом притока и стока из водоема, его морфометрическими характеристиками, рельефом дна и бароклинными эффектами. В водохранилищах руслового и долинного типов (Угличское, Чебоксарское, Ивановское, Саратовское, Волгоградское, Горьковское) преобладающее влияние на формирование общей

циркуляции вод оказывает объем притока в водоемы. В Рыбинском, Шекснинском и Куйбышевском водохранилищах, в обширных озеровидных плесах в безледный период основная роль в формировании поля течений принадлежит ветру и рельефу дна. Во всех водохранилищах в период весеннего половодья, когда в них поступают большие объемы воды, роль стоковых течений увеличивается. В период ледне–осенней межени, наоборот, в формировании поля течений возрастает роль ветра. Гидродинамический режим мелководной зоны водохранилищ в безледный период в большей степени определяется воздействием волнения и течений, связанных с действием ветра.

2.1. Пространственно–временная изменчивость течений в водохранилищах

Крупномасштабные временные и пространственные изменения динамических процессов (общей циркуляции) в водохранилищах Волжского каскада определяются межгодовыми и сезонными изменениями стока и синоптическими процессами над их акваториями. Как было показано, в экстремальные по водности годы объем притока в водохранилища каскада может изменяться более чем в три раза, а в период половодья превышать минимальное месячное поступление воды более чем в 6 раз. Такие колебания притока обуславливают изменение проточности водохранилища и, тем самым, интенсивности водообменных процессов и изменчивости стоковых течений.

2.1.1. Течения в нижних и верхних бьефах ГЭС

В зимний период, когда водная поверхность изолирована от непосредственного воздействия ветра ледовым покровом и ведется интенсивная сработка водохранилищ, основными течениями, определяющими макроциркуляцию вод, являются стоковые. Ввиду того, что в каскаде волжских водохранилищ все гидроэлектростанции работают в пиковом режиме с резкими колебаниями расходов воды в течение суток, на прилегающих к ним участках верхних и нижних бьефов режим движения носит неустановившийся характер [5, 13, 28, 29, 33]. Резкие изменения расхода воды

через турбины ГЭС вызывают возникновение длинных волн (волн попусков). В речной гидравлике их относят к волнам перемещения и разделяют на прямые – направление перемещения которых совпадает с направлением течения, и обратные – перемещающиеся против течения. По форме волны разделяются на положительные (волны повышения) и отрицательные (волны понижения) [3, 17]. Характер распространения волн по бьефу определяется морфометрическими особенностями последнего. При достаточно большой длине бьефа волна расплывается как за счет влияния сил сопротивления, возникших при перемещении волны, так и вследствие увеличения площади водного сечения. При наличии какого-либо препятствия на пути распространения волны или резкого изменения морфометрических характеристик бьефа происходит отражение волны. Теоретически и экспериментально показано, что при отражении волн от большой водной массы происходит смена знака волны (прямая положительная волна дает обратную отрицательную, а прямая отрицательная – обратную положительную). В случае отражения от вертикальной стенки волна не меняет знака.

Показано, что в водохранилищах с обширными озеровидными плесами (Рыбинское) в нижнем бьефе ГЭС при повышении расходов воды имеет место волновой цикл, состоящий из четырех волн: прямой положительной, обратной отрицательной, прямой отрицательной и обратной положительной. При отсутствии последующих возмущений (резких изменений расходов воды) следующий цикл начинается вновь с прямой положительной волны. В верхнем бьефе ГЭС при повышении расходов воды волновой цикл начинается со второй (обратной отрицательной) волны. При понижении расходов воды через ГЭС в нижнем бьефе цикл начинается с прямой отрицательной волны, а в верхнем бьефе – с обратной положительной волны [5, 13, 31].

Период полного волнового цикла равен учетверенному времени добегающей одной волны до места ее отражения (пренебрегая различиями в скорости прямых и обратных волн), т.е. для волн малой амплитуды, скорость распространения которых равна \sqrt{gH} ,

$$T = 4 \int_0^l \frac{ds}{\sqrt{gH}}; \quad (2.1)$$

где S – продольная координата, l – длина бьефа, H – средняя глубина участка.

С началом пуска и возникновением длинных волн в верхнем и нижнем бьефах ГЭС появляются и заметные скорости течения. По мере распространения этих волн в состояние неустановившегося движения приходят все большие участки со скоростью, равной скорости распространения волны. Скорость распространения гребня волны пуска, определенная по сдвигу фаз, на Верхневолжских водохранилищах изменяется от 9.7 до 11.1 м/с. Такого же порядка (или несколько меньше) величины были получены на Куйбышевском и Волгоградском водохранилищах [11, 23].

Продолжительность существования четко выраженного стокового течения на водохранилищах Волжского каскада зависит от продолжительности сбросов через ГЭС. При этом, по мере удаления от ГЭС происходит некоторое увеличение продолжительности существования течения. Это обусловлено тем, что одни и те же объемы воды вследствие расплывания волн пусков по мере удаления от ГЭС проходят через заданный створ за более длительный интервал времени.

Максимальные скорости течения в период пуска наблюдаются в районе гидростанций и постепенно уменьшаются с удалением от них. На водохранилищах Верхней Волги (Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Горьковское) скорости течения в зависимости от расстояния от ГЭС, как правило, изменяются от 0.80 до 0.07 м/с. На водохранилищах Средней и Нижней Волги (Куйбышевское, Саратовское, Волгоградское) – от 0.70 до 0.05 м/с.

Направление течения, вызванного прохождением прямой положительной волны в нижних бьефах ГЭС или обратной отрицательной в верхних бьефах, устойчиво и соответствует направлению затопленного русла реки. В верхних бьефах ГЭС на пойменных участках течение может иметь некоторую составляющую в направлении затопленного русла вследствие заполнения русла за счет водных масс, находящихся на пойме [25].

С прекращением попусков и возникновением в нижних бьефах прямой отрицательной волны, а в верхних – обратной положительной, скорости течения резко уменьшаются. При наличии отмеченного выше отражения волн может наблюдаться изменение направления перемещения расходов воды, что приводит к изменению направления течения. Детальные исследования, выполненные на Рыбинском водохранилище, показали, что смена направления течения в нижнем бьефе Угличской ГЭС начинается спустя 3–4 часа после прекращения сбросов воды и происходит в течение 20–60 мин. Максимальные скорости течения при обратном направлении составляют 6–14 см/с и наблюдаются через 5–6 часов после прекращения сбросов, т.е. в момент прохождения обратной положительной волны (рис. 2.1). В верхнем бьефе Рыбинской ГЭС смена направления течения происходит в течение 20–30 мин, а движение водных масс к центральной части водохранилища наблюдается 1.5–2 часа. Скорости течения при этом, как правило, не превышают 3–7 см/с.

Четкую картину периодичности течений в нижнем бьефе Угличской ГЭС дают корреляционные функции, которые имеют вид почти правильной синусоиды с периодом, равным 11.8 часа (рис. 2.2). Такую же периодичность имеют и колебания уровня в течение недельного цикла работы ГЭС. Кроме основного периода на периодограмме выделяются колебания с периодом 6 и 8 часов, природа которых, очевидно, связана с наложением свободных и вынужденных колебаний. Свободные колебания уровня аналогичны одноузловой сейше в заливе, граничащем с широким водоемом, и для нижнего бьефа Угличской ГЭС равны 10 часам, а для верхнего бьефа Рыбинской ГЭС – 3.3 часа. Такие колебания возникают в воскресные перерывы в работе ГЭС и обусловлены только отражением волны (морфометрическими характеристиками участков) [31, 40].

Периодические изменения скорости и направления течения приводят к тому, что в течение суток частицы воды совершают возвратно–поступательные движения при генеральном направлении перемещения в соответствии с бытовым течением Волги.

Наличие воскресных перерывов в работе ГЭС (недельное регулирование стока) может создавать “обратные” уклоны водной

поверхности, на значительных участках водохранилищ обнаруживаемые даже по среднесуточным значениям уровня (табл. 2.1). В частности, на участке Горьковского водохранилища у г. Костромы уровень в отдельные периоды мог быть выше, чем у г. Тутаева (расстояние между городами около 120 км) на 10–22 см (см. табл. 2.1). Подобная ситуация возникала почти каждый раз, когда среднесуточные сбросы через Рыбинскую ГЭС уменьшались с 800–1100 м³/с до 20–100 м³/с, и приводила к возникновению обратных течений.

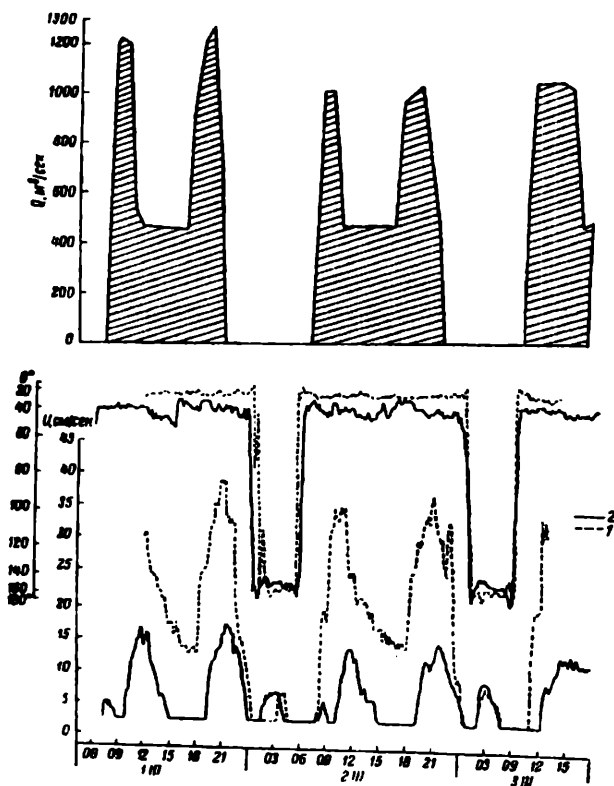


Рис. 2.1. Сбросы Угличской ГЭС и скорость и направление течения:
1 – скорость и направление течения у Мышкина;
2 – скорость и направление течения у Коприна

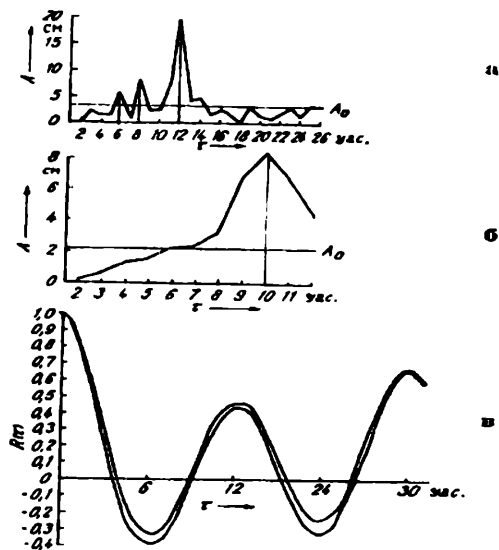


Рис. 2.2. Периодограмма вынужденных (а) и свободных (б) колебаний уровня и автокорреляционные функции составляющих течения в Рыбинском водохранилище

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

Результаты выполненных вычислений для стоковых течений в водохранилищах Верхней и Средней Волги показали, что: 1) скорость переноса в 3-6 раз меньше "мгновенных" скоростей течения; 2) в течение недельного цикла в работе ГЭС в нижних и верхних бьефах направление переноса устойчиво, но при воскресных перерывах в работе ГЭС перенос может иметь противоположное направление; 3) скорость переноса не остается постоянной и зависит

Таблица 2.1. Уровни воды (см) на постах Горьковского водохранилища

Водомерный пост, расстояние от ГЭС	1985 г.				1986 г.			
	11.08	29.09	3.10	7.10	15.06	5.07	6.07	2.08
г. Тутаев, 60 км	382	419	411	387	400	403	392	389
ΔН	-3	-1	-12	-9	-11	-4	-16	-5
г. Ярославль, 100 км	385	420	423	396	411	407	408	394
ΔН	-11	-9	-10	0	-1	-11	-3	-5
г. Кострома, 178 км	396	429	433	396	412	418	411	339

от многих факторов; 4) коэффициенты вариации "мгновенных" скоростей течения обратно пропорциональны скорости переноса; 5) скорость перемещения ядер консервативных примесей (загрязняющих веществ и скоплений гидробионтов) в большинстве случаев совпадает со среднесуточной скоростью течения на определенных участках [38, 39, 40].

Наряду с суточными и недельными изменениями скорости течения, обусловленными работой ГЭС, в волжских водохранилищах четко прослеживается сезонная изменчивость течений, связанная с внутригодовой динамикой речного стока. Максимальные скорости осредненного течения наблюдаются в период весеннего половодья. С наполнением водохранилищ до НПУ скорости переноса, обусловленные стоковыми течениями, минимальны. Зимой, при интенсивной сработке водохранилищ, скорости возрастают. При этом наблюдается четкая зависимость скорости течения от уровня наполнения водохранилища (табл. 2.2).

Основное скоростное поле стокового течения в водохранилищах формируется по затопленным руслам рек, поскольку потери энергии в зоне контакта с водными массами существенно больше, чем в придонном слое. Такое соотношение гидравлических сопротивлений приводит к тому, что транзитный поток протекает по пути с наименьшими потерями энергии, т.е. вблизи берега или в

затопленном русле. Максимальные скорости наблюдаются на горизонте 0.4-0.6 Н, а к поверхности и ко дну уменьшаются [5, 13, 25, 33].

Таблица 2.2. Зависимость скорости течения от уровня в Волжском плесе Рыбинского водохранилища

Уровень, м БС	Площадь водного сечения, м ²	Расход воды через ГЭС, м ³ /с	Средние из максимальных скоростей течения, м/с
99.5	12441	950-1000	0.16
99.3	11988	1100	0.18
98.8	10906	1050-1200	0.20
98.2	9743	1050-1200	0.24
97.3	7857	1050-1200	0.33

2.1.2. Течения в озеровидных плесах

Материалы полевых исследований, показывают, что в озеровидных плесах крупных водохранилищ (Рыбинское, Куйбышевское, Волгоградское) в безледный период перенос вод (течение) в верхнем трехметровом слое осуществляется под действием ветра и его направление соответствует направлению ветра за исследуемый период. При этом время, необходимое для установления течения, соответствующего данному ветру, невелико и не превышает 5 часов при скорости ветра 4–6 м/с. В глубинных же слоях промежуток времени, необходимый для установления нового направления течения, значительно больше. Отношение скорости поверхностного течения к скорости ветра (ветровой коэффициент) не является постоянной величиной, а зависит от скорости ветра, составляя 2 % при скорости ветра до 5 м/с и уменьшаясь до 0.9–1.2 % при скорости ветра свыше 10 м/с. Уменьшение ветрового коэффициента с увеличением скорости ветра связано с возрастанием влияния на течение трения о ложе водохранилищ в связи с их мелководностью (что особенно заметно на Рыбинском водохранилище). Компенсационные течения обычно развиваются ниже поверхностного трехметрового слоя. На их характер существенное влияние оказы-

вает рельеф дна. Как правило, компенсационное течение развивается на наиболее глубоких участках (затопленное русло, понижение дна). В отдельных случаях оно может захватывать всю водную толщу от поверхности до дна [13, 27].

Поскольку в безледный период основным источником энергии для развития течений в водохранилищах являются синоптические процессы (кроме сбросов воды через гидросооружения), то в спектре распределения кинетической энергии по характерным периодам на синоптические процессы (периоды) приходится от 50 до 80 % энергии. Кроме синоптических процессов для энергетических спектров Волжских водохранилищ характерны колебания скорости течения с периодом около суток и с периодами от 2 до 14 часов. Вклад этих колебаний в суммарную дисперсию скорости в различных водоемах сильно варьирует (от 4 до 20 %).

Спектральный анализ пространственно-временной изменчивости течений позволил оценить размеры макронеоднородностей динамики вод в водохранилищах каскада и их устойчивость при характерных гидрометеорологических условиях. Для Ивановского и Угличского водохранилищ средний размер вихревых образований составляет 300–500 м в направлении осредненного течения и 100–300 м – поперек осредненного течения, что говорит об их анизотропии. Продолжительность существования таких неоднородностей составляет 10–12 часов. При штормовых ситуациях размеры вихрей могут значительно превышать указанные и быть соизмеримыми с характерными размерами самого водоема или их плесов (участков) [30, 32, 34, 40].

В Рыбинском водохранилище и в озеровидных расширениях Куйбышевского водохранилища размеры макронеоднородностей могут достигать нескольких километров, а продолжительность их существования измеряться десятками часов. Наличие в энергетических спектрах колебаний с периодами в несколько часов свидетельствует о существовании и значительно более мелких образований, размеры которых определяются десятками метров, а продолжительность существования несколькими часами или даже минутами. Такие мезо-масштабные или даже микромасштабные неоднородности соответствуют процессу турбулентного перемешивания.

Проведенное сравнение спектральной структуры гидродинамических полей во всем диапазоне масштабов в различных водохранилищах каскада выявило существенную роль их морфометрических характеристик как фактора, определяющего пространственно-временную изменчивость. Особенно четко существенная роль морфометрии течений проявляется в течениях, вызванных сейшми. Классический пример таких течений был зафиксирован в Белозерском плесе Шекснинского водохранилища 26–27 июля 1964 г. (рис. 2.3). Сейшевые течения были вызваны кратковременным усилением ветра. Период изменения течений составил 3 часа 10 мин. и соответствовал периоду одноузловой поперечной сейши, равному 3 часам 16 мин. [32].

Таким образом, основными факторами, генерирующими динамические процессы в водохранилищах и обуславливающими их пространственно-временную изменчивость, служат климатические факторы, определяющие приток солнечной радиации и межгодовые и сезонные изменения в стоке рек, кинетическая энергия ветра, суточное и недельное регулирование стока через гидросооружения, а также морфометрические характеристики водоемов.

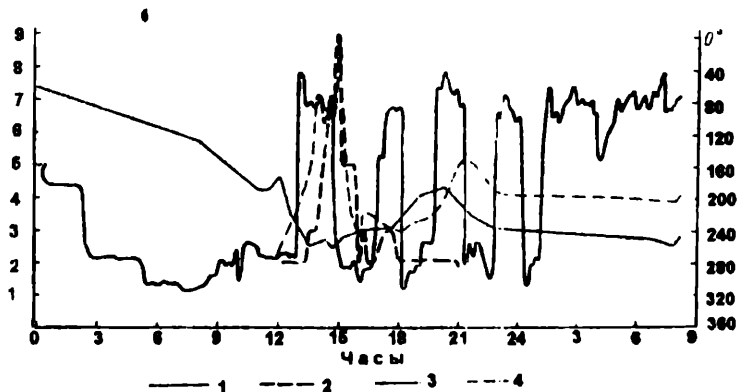


Рис. 2.3. Скорость и направление ветра и течения на Белом озере по данным наблюдений 26–27 июля 1964 г. (скорость течения на горизонте 1.5 м, скорость ветра осреднена за 10-минутный интервал). По оси ординат: слева – скорость течения, см/сек., скорость ветра, м/сек.; справа – направление ветра и течения, град. 1 – направление течения; 2 – скорость течения; 3 – направление ветра; 4 – скорость ветра

2.2. Характеристика макротурбулентного обмена

Длительные наблюдения над течениями на автономных буйковых станциях и использование статистической теории турбулентности позволяют нам выполнить оценки характеристики горизонтального макротурбулентного обмена в ряде водохранилищ Волжского каскада. Эти оценки показали, что в различных по площади, объему и водообмену водохранилищах (Иваньковское, Рыбинское, Куйбышевское) четко прослеживается анизотропия обмена: 1) обмен в направлении осредненного переноса вод значительно больше обмена в направлении, перпендикулярном транзитному расходу; 2) максимальные значения коэффициентов обмена наблюдаются в поверхностном слое и с глубиной заметно убывают; 3) величины коэффициентов горизонтального турбулентного обмена в Иваньковском водохранилище меньше таковых в Рыбинском и Куйбышевском водохранилищах [6, 39, 45].

Ввиду существенных изменений среднесуточных скоростей течения, коэффициенты макрообмена, вычисленные по отклонениям от среднесуточных значений скорости, не остаются постоянными. При этом следует отметить, что величина коэффициентов зависит не столько от абсолютной величины средней скорости течения, сколько от интенсивности турбулентности. Значения коэффициента горизонтального турбулентного обмена для Иваньковского водохранилища изменяются от 1.4 до $9.8 \cdot 10^4$ $\text{г см}^{-1} \text{с}^{-1}$, для Рыбинского и Куйбышевского водохранилищ от $1.0 \cdot 10^4$ до $1.9 \cdot 10^6$ $\text{г см}^{-1} \text{с}^{-1}$ (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Характеристики коэффициентов горизонтального турбулентного обмена в Иваньковском и Рыбинском водохранилищах

Водохранилище	Горизонт, м	$A_{\gamma} \cdot 10^6$	$A_{\lambda} \cdot 10^6$	$A_{\gamma\lambda} \cdot 10^6$	$A_{\lambda\gamma} \cdot 10^6$
Иваньковское	2.0	0.098	0.129	0.071	0.054
	10.0	0.049	0.037	-0.012	-0.012
	14.0	0.014	0.096	-0.003	-0.014
Рыбинское	2.0	1.920	0.113	-0.489	-0.315
	4.5	0.025	0.220	-0.050	-0.078
	8.0	0.240	0.810	-0.110	-0.270

Значения коэффициентов макрообмена в значительной степени также зависят от периода осреднения, который косвенно выражает масштаб явления. Последний, в свою очередь, связан со сложным спектральным составом полей гидрологических характеристик. Если бы пульсации скорости имели лишь один период, то осреднение с любым периодом, большим периода пульсаций, не приводило бы к изменению средних скоростей и величин среднеквадратических отклонений. При наличии в поле скорости пульсаций с самыми различными периодами каждый новый период осреднения приводит к новым характеристикам турбулентности. С ростом периода осреднения отмечается более интенсивное увеличение обмена вдоль потока, что еще раз подтверждает положение об анизотропии крупномасштабных вихрей (рис. 2.4).

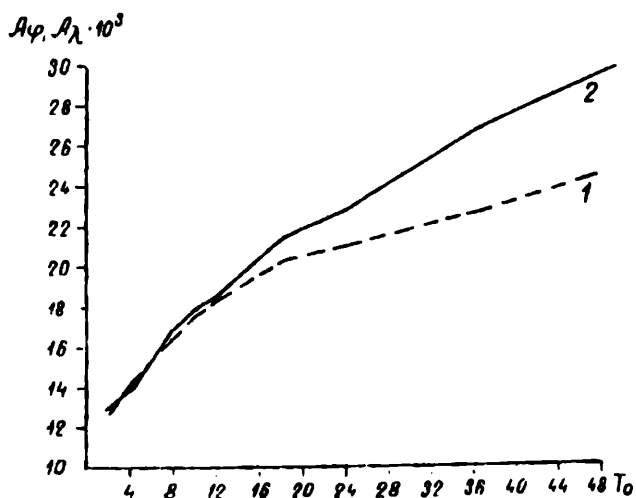


Рис. 2.4. Зависимость коэффициентов макрообмена A_ϕ (1) и A_λ (2) от периода осреднения в Ивановском водохранилище

При уменьшении горизонтальных масштабов вихрей до 100 м и меньше горизонтальный обмен становится изотропным и значения коэффициентов обмена выравниваются.

Как и в мелководных морях, максимальные значения коэффициентов обмена совпадают с направлением береговой черты, а в перпендикулярном к ней обмен наименее интенсивен.

Оценка коэффициента вертикального турбулентного обмена (A_v) для Рыбинского водохранилища, считая, что характер турбулентных процессов в поверхностном слое водоема обуславливается ветровым волнением, показала, что при скорости ветра 5 м/с в центральной части водохранилища на поверхности $A_v = 34.9 \text{ г см}^{-1} \text{ с}^{-1}$. С увеличением силы ветра до 10 м/с A_v увеличивается до $99 \text{ г см}^{-1} \text{ с}^{-1}$. При скорости ветра 20 м/с $A_v = 260 \text{ г см}^{-1} \text{ с}^{-1}$. С глубиной величина A_v быстро убывает (рис. 2.5). Если при скорости ветра до 5 м/с на глубине 2 м величина коэффициента вертикального турбулентного обмена не превышает $1 \text{ г см}^{-1} \text{ с}^{-1}$, то с ростом скорости ветра до 20 м/с на глубине 7 м значение A_v составляет $8 \text{ г см}^{-1} \text{ с}^{-1}$ и волновое перемешивание охватывает практически всю водную толщу.

2.3. Моделирование течений в водохранилищах

Схожесть спектров гидродинамических процессов в мелководных морях, некоторых озерах и водохранилищах, а также один и тот же порядок линейных размеров (L/h или $B/h = 10^4 - 10^3$) дали основание использовать в практике расчета течений ряд моделей, разработанных первоначально для мелководных морей. В частности, для моделирования циркуляции вод в водохранилищах Волжского каскада, Сасыкском водохранилище и оз. Плещеево была использована стационарная модель мелкого моря А.И. Фельзенбаума [34].

Несмотря на ряд ограничений (стационарность модели, неизменность объема водоема, постоянные значения притока и стока, неучет силы Кориолиса) применение данной модели позволяет учесть основные факторы, формирующие макроциркуляцию вод: ветер, морфометрические характеристики водоема, приток в водоем и сток из него. Кроме того, результаты расчетов позволяют исследовать пространственную структуру течений, проанализировать изменчивость циркуляции при различных гидрометеорологических условиях, выявить роль стоковых, ветровых и компенсационных течений.

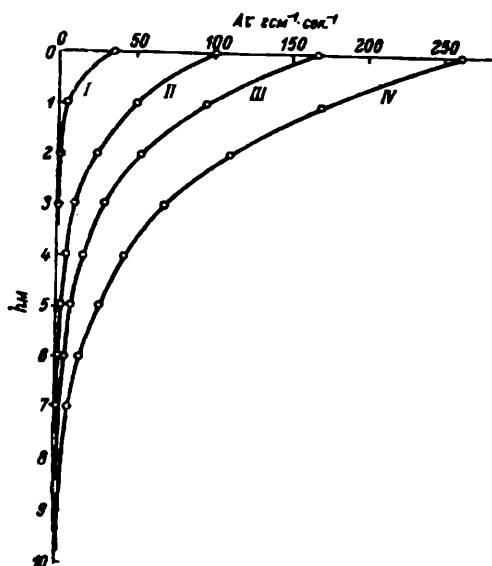


Рис. 2.5. Изменения коэффициента вертикального турбулентного обмена с глубиной в Рыбинском водохранилище: I, II, III, IV при скоростях ветра 5, 10, 15, 20 м/с соответственно

При расчете течений (циркуляции) по стационарной модели мелкого моря предполагается, что движение воды обуславливается тангенциальным напряжением ветра на водную поверхность, динамическим наклоном поверхности, вызванным воздействием ветра и притоком и стоком вод из водоема. Движущие силы уравновешиваются вертикальной вязкостью и трением о дно. Основные характеристики течений (компоненты скорости u , v вдоль осей x и y и динамические наклоны поверхности водоема ζ) могут быть получены, если известно распределение функции полных потоков ψ . Расчет поля полных потоков сводится к численному решению эллиптического дифференциального уравнения в частных производных [9]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{A}{H^3} \frac{d\psi}{dx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{A}{H^3} \frac{d\psi}{dy} \right) = 0.5 \operatorname{rot}_z T / H. \quad (2.2)$$

Граничные условия при решении задачи сводятся к следующему: в непосредственной близости от береговой черты отсутствуют расходы в направлении нормали к берегу ($\Psi=0$); на жидкой границе

– ее нормальная производная $\frac{d\Psi}{dn} = 0$ (условие свободного протекания).

Коэффициент турбулентной вязкости (A) в модели не постоянен, зависит от скорости ветра и глубины и вычисляется по выражению:

$$A = \gamma w H / 4 \rho_0 K, \quad (2.3)$$

где γ – постоянная величина, равная $3.25 \cdot 10^{-6}$ г/см³; w – скорость ветра; H – глубина; K – ветровой коэффициент, равный 0.016; $\rho_0 = 1$ г/см³.

Динамические наклоны водной поверхности и компоненты скорости течения выражаются через Ψ следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{d\zeta}{dx} &= -\frac{3\tau_x}{2g\rho_0 H} - \frac{3A}{g\rho_0 H^3} \frac{d\psi}{dy} \\ \frac{d\zeta}{dy} &= -\frac{3\tau_y}{2g\rho_0 H} - \frac{3A}{g\rho_0 H^3} \frac{d\psi}{dx} \\ u &= \frac{\tau_x}{A} (H - z) + \frac{g\rho_0}{A} \cdot \frac{H^2 - z^2}{2} \frac{d\zeta}{dx} \\ v &= \frac{\tau_y}{A} (H - z) + \frac{g\rho_0}{A} \cdot \frac{H^2 - z^2}{2} \frac{d\zeta}{dy}, \end{aligned} \quad (2.4)$$

где τ_x , τ_y – составляющие тангенциального напряжения ветра по оси x и y ($\tau_x = \gamma |w| \cdot w_x$; $\tau_y = \gamma |w| \cdot w_y$). Так как уравнение для функции полных потоков (Ψ) получено при допущении $\zeta \ll H$, а расходы в направлении нормали к берегу отсутствуют, то выбор граничного контура, аппроксимирующего водоем, определяется условием – $H_{гр} \approx 0.1 H_{ср} + 0.2 H_{ср}$. Исходя из точности задания поля

ветра, поля глубин и изрезанности береговой линии выбирается шаг разности $\Delta x = \Delta y = L$.

Основным критерием адекватности модели реальным процессам переноса вод в водоеме служит соответствие расчетных параметров течений данным натурных наблюдений. Верификация модельных расчетов водохранилищ и многочисленных натурных наблюдений показала удовлетворительное соответствие расчетных и фактически наблюдаемых параметров [2, 9, 34]. Коэффициент корреляции между наблюдаемыми и рассчитанными скоростями течения на Рыбинском водохранилище составил $r_v = 0.87 \pm 0.04$, а для направления течения $r_o = 0.81 \pm 0.05$.

Расчеты для водохранилищ различного типа показали, что в водоемах, имеющих простую форму с относительно ровным рельефом дна, наблюдается циркуляция вод в виде двух основных вихрей (Белозерский плес Шекснинского водохранилища, оз. Плесеево, Сасыкское водохранилище). В водоемах со сложной конфигурацией и рельефом дна (Рыбинское, Куйбышевское, Камское водохранилища) число и расположение вихрей согласуется с формой котловины (рис. 2.6). Так, в Рыбинском водохранилище в

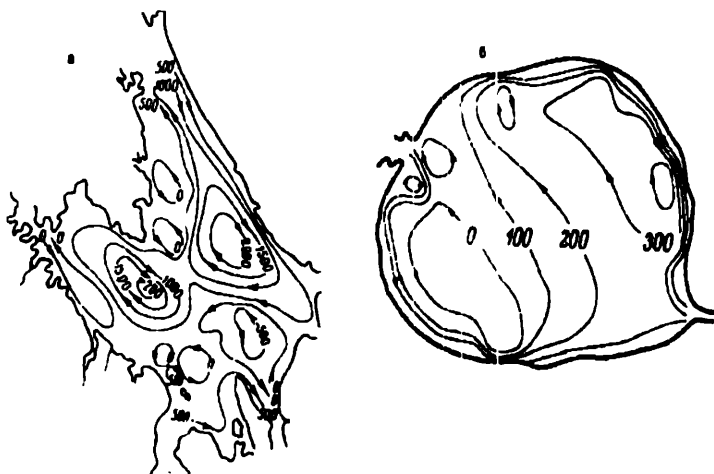


Рис. 2.6. Схема интегральной циркуляции вод в Рыбинском водохранилище (а) и Белом озере (б)

Коэффициент мгновенного водообмена M_i показывает, какая часть водной массы сменяется за 1 с. Величина, обратная

$M_i - \left(\frac{1}{M_i} \right)$, дает время, необходимое для того, чтобы вся водная

масса, заполняющая участок, сменилась на новую при условии неизменности циркуляционных процессов в водоеме.

Поскольку применяемая модель дает возможность расчета установившейся интегральной циркуляции при неизменном объеме водоема (и соответственно участка) с учетом воздействия ветра, то для любого замкнутого участка i его объем $w_{y,i} = \text{const}$, $\Sigma Q_{\text{пр}} = \Sigma Q_{\text{ст}}$, а коэффициент мгновенного водообмена равен

$M_i = \frac{\Sigma Q_{\text{пр}}}{w_y}$, где $\Sigma Q_{\text{пр}}$ – разность значений функции полных по-

токов на границах участка с учетом ее направленности [53, 69].

Выполненные для Рыбинского водохранилища расчеты показали, что в безледный период для участков, в интенсивности водообмена которых основную роль играют стоковые течения, проявляется прямая зависимость периода водообмена от объема притока в водохранилище и сбросов воды через гидросооружения. Для участков Главного плеса интенсивность водообмена определяется ветровой циркуляцией и в гораздо меньшей степени зависит от водности года.

Для них характерно увеличение интенсивности водообмена к осени, что обусловлено уменьшением объема участков вследствие понижения уровня водохранилища и роста ветровой активности.

Глава 3. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И СТРУКТУРА ПОЛЕЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Поля гидрофизических характеристик в водохранилищах (температуры, электропроводности, прозрачности и др.) можно рассматривать как структуры физической системы водоема, отражающие распределение тепла, солей, взвесей и т.д. в водной толще и характеризующиеся пространственной и временной изменчи-

востью. В таком понимании их структура и изменчивость могут быть представлены как совокупность колебаний с различными периодами и характерными длинами волн.

3.1. Закономерности формирования поля температуры в водохранилищах

Результаты исследований показывают, что, несмотря на то, что водохранилища Волжского каскада расположены в различных ландшафтно-географических зонах – от тайги до полупустыни, – естественные сезонные изменения поступления тепла и динамика водных масс определили в годовом термическом цикле водохранилищ следующие основные характерные периоды: зимний, весенне-летний прогресса и осеннего охлаждения. Зимний период характеризуется повышенным водообменом, так как совпадает с началом активной сработки водохранилищ. Продолжительность его колеблется в широких пределах и, кроме широтной зональности, во многом определяется гидрометеорологическими условиями года. За начало зимнего периода большинство авторов принимает дату полного установления ледостава, а за окончание – дату полного очищения ото льда. В рамках такого представления средняя продолжительность ледостава по каскаду изменяется от 101 суток на Волгоградском водохранилище до 151 суток на Рыбинском [56, 57].

Характер изменения температуры воды в зимний период определяется прежде всего динамикой вод на отдельных участках. На проточных русловых и мелководных участках водохранилищ температура воды наиболее низкая и однородная по глубине. В глубоководных озеровидных плесах она в значительной степени зависит от теплообмена между грунтами и водной толщей. При этом в течение зимы может наблюдаться постепенное повышение температуры за счет теплоотдачи дна, что приводит к увеличению теплозапаса и развитию обратной стратификации. Для Рыбинского водохранилища интенсивность прогресса на некоторых участках составляет 0.04–0.08 °C/сут. и во второй половине марта температура придонного слоя может достигать 4.6 °C [8]. Размеры температурных неоднородностей определяются морфометрическими особенностями водоема и динамикой его вод. Наиболее высокие

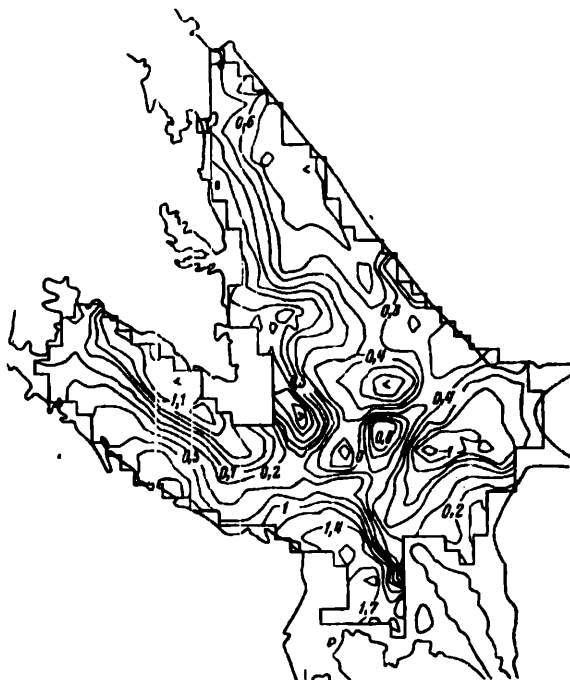


Рис. 2.7. Топография уровенной поверхности, мм

2.4. Оценка внутреннего водообмена

Выполненные модельные расчеты течений позволили предложить способ оценки внутреннего водообмена – водообмена между водными массами или участками водных масс одного и того же водоема. Обычно используемое выражение для оценки водообмена

$$K_s = \frac{v_{пр.}}{w_y}, \quad (2.5)$$

где $v_{пр.}$ – среднегодовой объем притока к участку, $w_{уч.}$ – объем участка, учитывает сменность вод только под влиянием стоковых течений. В безледный период, когда на большей части акватории

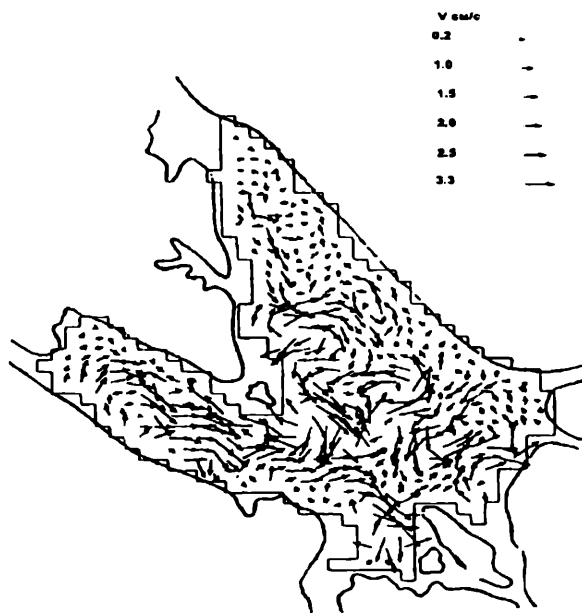


Рис. 2.8. Поле градиентных течений на глубине 1 м в Рыбинском водохранилище

водохранилищ или их озеровидных плесов преобладают ветровые течения, применение данного выражения не дает адекватных результатов.

Поскольку разность значений функции полных потоков в двух любых произвольно взятых точках дает расход воды между вертикалями, проведенными через эти точки, интенсивность внутреннего водообмена для каждого конкретного участка с учетом направления интегрального переноса можно оценить следующим выражением:

$$M_e = \frac{\Sigma Q_{\text{пр.}} + \Sigma Q_{\text{ст.}}}{2w_y}, \quad (2.6)$$

где M_e – коэффициент мгновенного водообмена, $\Sigma Q_{\text{пр.}}$ – сумма расходов воды, поступающей в участок, $\Sigma Q_{\text{ст.}}$ – сумма расходов воды вытекающей из участка, w_y – объем воды, заполняющий участок.

Коэффициент мгновенного водообмена M_e показывает, какая часть водной массы сменяется за 1 с. Величина, обратная $M_e - \left(\frac{1}{M_e} \right)$, дает время, необходимое для того, чтобы вся водная масса, заполняющая участок, сменилась на новую при условии неизменности циркуляционных процессов в водоеме.

Поскольку применяемая модель дает возможность расчета установившейся интегральной циркуляции при неизменном объеме водоема (и соответственно участка) с учетом воздействия ветра, то для любого замкнутого участка i его объем $w_{yч.i} = \text{const}$, $\Sigma Q_{пр.} = \Sigma Q_{ст.}$, а коэффициент мгновенного водообмена равен

$$M_e = \frac{\Sigma Q_{пр.}}{w_{y.}}$$

, где $\Sigma Q_{пр.}$ – разность значений функции полных по-

токов на границах участка с учетом ее направленности [53, 69].

Выполненные для Рыбинского водохранилища расчеты показали, что в безледный период для участков, в интенсивности водообмена которых основную роль играют стоковые течения, проявляется прямая зависимость периода водообмена от объема притока в водохранилище и сбросов воды через гидросооружения. Для участков Главного плеса интенсивность водообмена определяется ветровой циркуляцией и в гораздо меньшей степени зависит от водности года.

Для них характерно увеличение интенсивности водообмена к осени, что обусловлено уменьшением объема участков вследствие понижения уровня водохранилища и роста ветровой активности.

Глава 3. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И СТРУКТУРА ПОЛЕЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Поля гидрофизических характеристик в водохранилищах (температуры, электропроводности, прозрачности и др.) можно рассматривать как структуры физической системы водоема, отражающие распределение тепла, солей, взвесей и т.д. в водной толще и характеризующиеся пространственной и временной изменчи-

востью. В таком понимании их структура и изменчивость могут быть представлены как совокупность колебаний с различными периодами и характерными длинами волн.

3.1. Закономерности формирования поля температуры в водохранилищах

Результаты исследований показывают, что, несмотря на то, что водохранилища Волжского каскада расположены в различных ландшафтно-географических зонах – от тайги до полупустыни, – естественные сезонные изменения поступления тепла и динамика водных масс определили в годовом термическом цикле водохранилищ следующие основные характерные периоды: зимний, весенне-летний прогрева и осеннего охлаждения. Зимний период характеризуется повышенным водообменом, так как совпадает с началом активной сработки водохранилищ. Продолжительность его колеблется в широких пределах и, кроме широтной зональности, во многом определяется гидрометеорологическими условиями года. За начало зимнего периода большинство авторов принимает дату полного установления ледостава, а за окончание – дату полного очищения ото льда. В рамках такого представления средняя продолжительность ледостава по каскаду изменяется от 101 суток на Волгоградском водохранилище до 151 суток на Рыбинском [56, 57].

Характер изменения температуры воды в зимний период определяется прежде всего динамикой вод на отдельных участках. На проточных русловых и мелководных участках водохранилищ температура воды наиболее низкая и однородная по глубине. В глубоководных озеровидных плесах она в значительной степени зависит от теплообмена между грунтами и водной толщей. При этом в течение зимы может наблюдаться постепенное повышение температуры за счет теплоотдачи дна, что приводит к увеличению теплозапаса и развитию обратной стратификации. Для Рыбинского водохранилища интенсивность прогрева на некоторых участках составляет 0.04–0.08 °C/сут. и во второй половине марта температура придонного слоя может достигать 4.6 °C [8]. Размеры температурных неоднородностей определяются морфометрическими особенностями водоема и динамикой его вод. Наиболее высокие

температуры зимой наблюдаются в годы, когда ледостав устанавливается при штилевой погоде и водохранилище замерзает, обладая большим теплозапасом.

Период весеннего нагревания на водохранилищах в основном приходится на интенсивный подъем уровня, увеличение объема и площади зеркала. Интенсивный прогрев водной массы в водохранилищах Волжского каскада наблюдается во второй половине мая – начале июня. Прирост температуры за 3 декаду мая по береговым постам составляет от 2.5 до 4.0 °C на Верхней Волге, 2.8–4.5 °C на Средней Волге и от 3.0 до 4.5 °C на Нижней Волге.

С уменьшением интенсивности водообмена на спаде половодья в водохранилищах развивается температурное расслоение водной толщи, характер и степень которого на отдельных участках различны. Основные причины формирования температурной стратификации – натекание более теплых и маломинерализованных вод половодья на более холодные и минерализованные зимние воды, а также интенсивный прогрев поверхностного слоя [36, 61]. Максимальные градиенты температуры в термокLINE на всех водохранилищах каскада наблюдаются в слое 2–4 м и в среднем составляют 1–3 °C/м, достигая в отдельных случаях 7 °C/м. Особенно сложная структура наблюдается во фронтальной зоне. В результате больших горизонтальных и вертикальных градиентов температуры и электропроводности здесь активизируются интрузионные процессы, увеличивающие активную поверхность, через которую происходит обмен теплом и солями. Анализ многочисленных зондирований показал, что толщина интрузионных слоев колеблется от 12 до 100 см, а градиенты температуры в них – до 0.2 °C/см. Во многих случаях зоны резких изменений термодинамических свойств совпадают с зонами высоких значений вертикального сдвига скорости.

Наличие или отсутствие термоклина в водоеме играет определяющую роль в процессах перемешивания, теплообмена, сказывается на характере движения вод, газовом режиме водоема и т.д. Термическое расслоение существенно влияет на распределение гидробионтов в толще вод, дифференцируя их по видовому составу.

Среднемесячная температура поверхностного слоя воды достигает максимума в июле, водной массы – в августе. Амплитуда е-

колебаний для водохранилищ Верхней Волги 2.3–10.4 °С, Средней – 1.1–5.0 °С, Нижней 2.2–4.4 °С. Наиболее низкие температуры характерны для Рыбинского и Горьковского водохранилищ, более высокие для Куйбышевского и Волгоградского.

Понижение температуры начинается со второй декады августа. В сентябре интенсивность осеннего охлаждения увеличивается, наиболее активно этот процесс идет на водохранилищах Верхней Волги, где понижение температуры составляет 5.5–6.0 °С, Средней – 5.2–5.5 °С, Нижней 4.2–4.5 °С. При этом значительно возрастает роль конвективного перемешивания, приводящего к вертикальной изотермии и изменению теплозапаса водной массы.

3.2. Временная изменчивость гидрофизических характеристик

Исследования показывают, что в водохранилищах может быть выделено три типа изменчивости гидрофизических характеристик, относящихся к макро-, мезо- и микромасштабам. К макромасштабам относятся процессы, имеющие периоды межгодовой и сезонной изменчивости, обусловленные климатическими характеристиками, вызывающими изменения в речном стоке и внешнем водообмене, которые были рассмотрены ранее. Для консервативных показателей качества воды (электропроводность, прозрачность, цветность, температура) определяющее значение имеют межгодовые колебания водности и циркуляционные атмосферные процессы над водосбором [36, 57, 79].

Мезомасштабные колебания обусловлены внутрисезонной синоптической изменчивостью и имеют периоды от нескольких суток до нескольких часов, характерные для всех водохранилищ каскада. Основными механизмами, обуславливающими мезомасштабную изменчивость, являются синоптические процессы, проявляющиеся в изменениях притока тепла и кинетической энергии ветра с периодами от 10–12 суток до 2–3 суток. Эти процессы в первую очередь оказывают влияние на гидродинамику водоема, проявлением изменчивости которой является появление соответствующих периодов в колебаниях гидрофизических и гидрохимических характеристик. Колебания с синоптическим периодом имеют максимальную энергию (дисперсию) и наиболее активно

проявляются в эпилимнионе в период интенсивного прогрева водной массы. Следующими по величине энергии являются суточные колебания гидрофизических характеристик. По нашим данным суточные изменения температуры воды за счет теплообмена с атмосферой составляют в эпилимнионе до 3°C [36, 37, 61].

Спектральный анализ длительных записей температуры воды на различных горизонтах в Рыбинском и Ивановском водохранилищах показал, что кроме суточной изменчивости отчетливо просматриваются колебания с периодом 10–11 часов, 5–6 часов и около 1.5 часов (рис. 3.1).

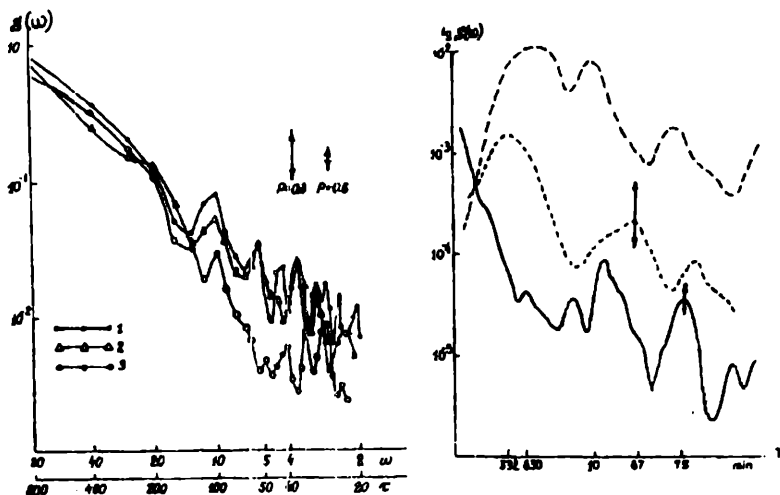


Рис. 3.1. Спектры временных колебаний температуры в Ивановском (а) и Рыбинском (б) водохранилищах

Кроме того, в области микромасштабов в спектрах имеется целая серия пиков с периодами от 1 часа до 7–10 минут. Основным механизмом формирования флуктуаций температуры с периодами 5–10 часов являются длиннопериодные внутренние волны, источником энергии для которых служит неравномерность работы гидросооружений, расположенных на водохранилищах, кратковременные усиления ветра и морфометрия водоемов, опре-

деляющая свободные колебания (типа сейш) водной массы. Оценка распределения плотности и связанной с ней частоты Брента-Вейсяля показала, что в водохранилищах в периоды термического (и плотностного) расслоения водной массы возможны колебания термоклина (изменения температуры) с периодами менее 1 минуты (рис. 3.2).

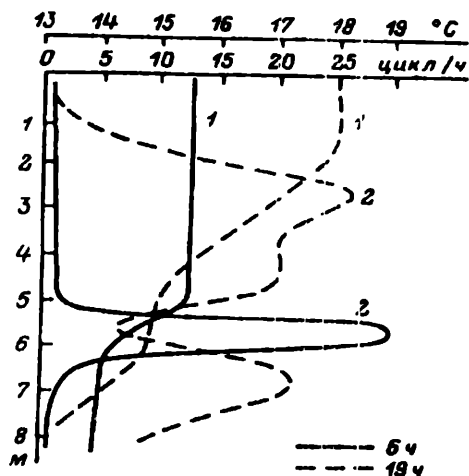


Рис. 3.2. Распределение температуры воды (1, °C) и частоты Брента-Вейсяля (2, цикл/час)

Начиная с временных масштабов от 1.5–2.0 часов и ниже, распределение дисперсии подчиняется законам турбулентного обмена и короткопериодных внутренних волн. В диапазонах колебаний от 1 часа до 2–10 минут уровень спектральной плотности падает с увеличением частоты по степенному закону с показателем степени от - 3 до - 4/3, что характерно для турбулентно-конвективных образований, локально-изотропной турбулентности и короткопериодных внутренних волн (рис. 3.3). Короткопериодным внутренним волнам (периоды от 6 с до 5 мин.) при средних скоростях течения в районах наблюдений 2–6 см/с соответствуют пространственные масштабы от 1 до 21 м. Скорости вертикального переноса в них составляют от 0.02 до 1.9 см/с.

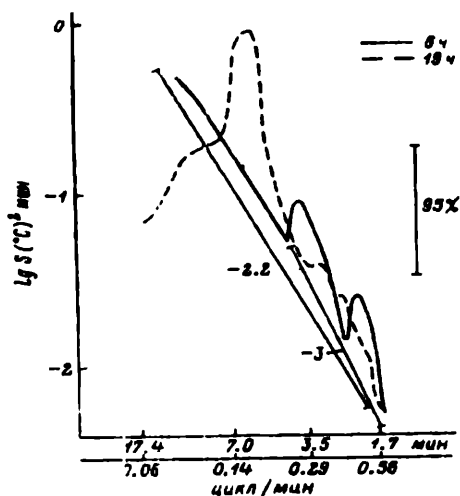


Рис. 3.3. Спектры изменения температуры воды

В то же время были отмечены случаи, когда при амплитуде колебания температуры 2.5°C и периоде 52 с вертикальная составляющая скорости достигала 7 см/с, что, несомненно, оказывает заметную роль на распределение и вертикальную миграцию фито- и зоопланктона.

Наши исследования показали, что мезомасштабные и микро-масштабные флуктуации температуры наиболее четко проявляются в эпи- и металимнионе, тогда как макромасштабные характерны для всей водной массы.

Частота Брента-Вейселя (N) служит также показателем устойчивости водных масс. Параметр устойчивости E через N определяется как $E = N^2/g$. Выполненные оценки показали, что наибольшей устойчивостью обладает эпи- и металимнион. Использование критерия Ричардсона (Ri) для оценки вертикальной устойчивости водных масс в водохранилищах дало величину $Ri = 0.3-0.5$, т.е. при Ri менее 0.5 разность температур по вертикали не превышает $1-1.5^{\circ}\text{C}$ [36].

Кратковременные усиления ветра до 4–8 м/с (шквалы) обуславливают образование квазиоднородного перемешанного слоя до глубины 2–3 м и резкое возрастание градиентов температуры на нижней границе. Дальнейший прогрев водной массы за счет солнечной радиации приводит к формированию нескольких зон с повышенными градиентами. В то же время, в относительно мелководных равнинных водохранилищах при сильных ветрах, определяемых изменением синоптической ситуации, развивающийся гермоклин может быть полностью разрушен в течение нескольких часов. Активное ветровое перемешивание – основной источник поступления тепла в глубинные слои.

С общим прогревом водной массы водохранилищ, достижением максимальной температуры в июле–августе и уменьшением горизонтальных и вертикальных градиентов гидрофизических характеристик энергия мезо– и микромасштабных колебаний значительно уменьшается, и в спектрах временной изменчивости преобладают синоптические и суточные колебания.

3.3. Пространственные изменения гидрофизических характеристик

Температурные условия в водоеме определяются его объемом и объемом притока к нему. В водохранилищах Верхней Волги (Иваньковском, Угличском), объем которых при НПУ в 4 раза меньше среднего многолетнего притока, в первую фазу половодья наблюдается равномерное распределение температуры по акватории и глубине. Во вторую фазу за счет более интенсивного прогрева на водосборе возникает горизонтальная неоднородность в поле температуры, при сохранении равномерного распределения ее по вертикали. При объеме водохранилища, превышающем объем весеннего половодья, контрастность в распределении температуры по акватории существенно увеличивается [36, 43, 75].

Использование быстродействующей автономной и зондирующей аппаратуры показало, что в водохранилищах каскада можно выделить следующие структурные образования гидрофизических характеристик: 1) скачкообразные изменения, обычно наблюдающие в зоне гидрологических фронтов; 2) неоднородности с масштабами порядка нескольких километров (крупномас-

штабные); 3) неоднородности с масштабами от нескольких сот метров до 1–2 км (мезомасштабные); 4) мелкомасштабные – от нескольких метров до десятков метров (рис. 3.4, 3.5).

Положение гидрологических фронтов, продолжительность их существования, скорость перемещения и величина градиентов различных гидрофизических характеристик в них, определяется величиной внешнего водообмена, характером общей циркуляции вод и интенсивностью турбулентного обмена. В весенний период ширина фронтальной зоны изменяется, как правило, от 1 до 5 км, а градиенты температуры в среднем составляют $1^{\circ}\text{C}/\text{км}$, однако в отдельные периоды могут достигать $5\text{--}7^{\circ}\text{C}/\text{км}$ [36, 43, 76]. С общим прогревом вод горизонтальные градиенты во фронтальных зонах уменьшаются. На протяжении всего безледного периода резкие скачкообразные изменения температуры наблюдаются в районе сброса подогретых вод тепловых электростанций. Градиенты электропроводности во фронтальных зонах, как правило, изменяются от 20 до 50 мк Сим/км. Однако в отдельных случаях могут достигать 150–300 мк Сим/км (например, в Чебоксарском водохранилище между водами Оки и Волги).

Крупномасштабные неоднородности полей гидрофизических характеристик как и фронтальные зоны, представляют собой проявление генеральных черт структуры водных масс водохранилищ, зон их трансформации и смешения, общей циркуляции вод и неоднородностей прогрева отдельных районов. Градиенты температуры воды в них составляют $0.3\text{--}1.0^{\circ}\text{C}/\text{км}$, но в отдельных случаях могут достигать $2^{\circ}\text{C}/\text{км}$. Градиенты электропроводности в таких неоднородностях составляют от 10 до 30 мк Сим/км. С особенностями динамической структуры вод водохранилищ связаны и мезомасштабные неоднородности в полях температуры и электропроводности.

Они могут быть обусловлены наличием мезомасштабных циркуляционных зон над различными неровностями рельефа дна, как было показано в предыдущем разделе, отрывом отдельных пятен "холодной" или "теплой" воды при неравномерном прогреве, поступлением отдельных объемов вод с повышенной минерализацией из притоков водохранилища. Амплитуда колебаний температуры в таких неоднородностях изменяется от десятка градусов до $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$, а электропроводности от 10 до 50 мк Сим

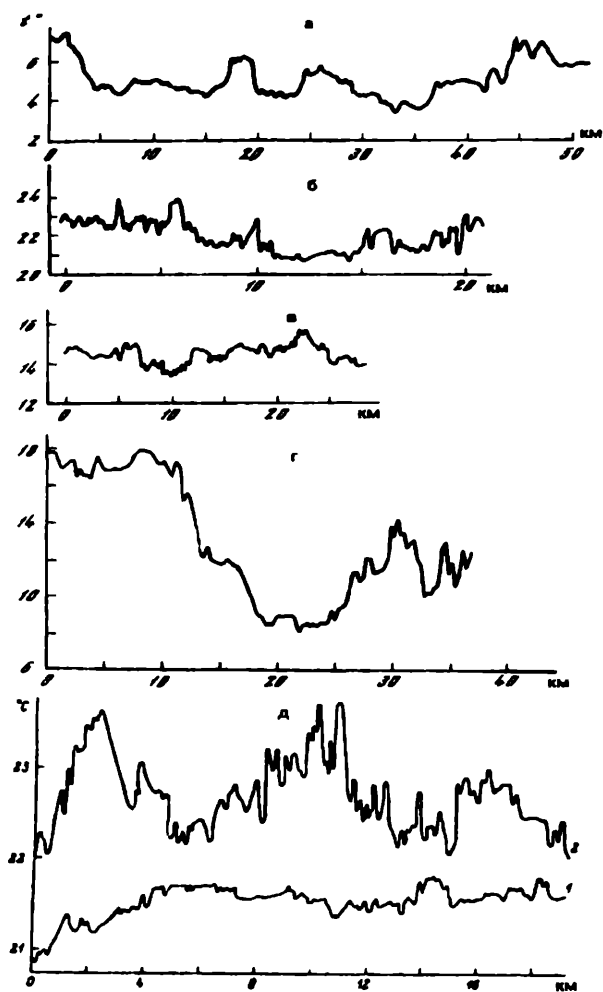


Рис. 3.4. Фрагменты записи распределения температуры воды на горизонте 1 м в Рыбинском (а-в), Шекснинском (г), Горьковском (д, 1) и Чебоксарском (д, 2) водохранилищах

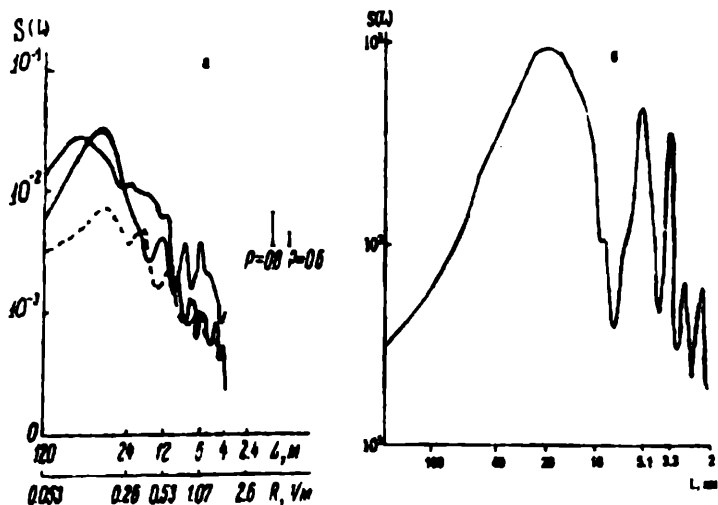


Рис. 3.5. Спектры пространственных колебаний температуры в Ивановском (а) и электропроводности в Чебоксарском (б) водохранилищах

В соответствии с этим и градиенты изменяются в широких пределах. Мелкомасштабные изменения температуры наблюдаются только в период интенсивного прогрева водной массы в штилевые дни, и амплитуда их колеблется от 0.1 до 2.5 °C. Температурные градиенты в них могут достигать 0.3–0.4 °C/м, т.е. вполне соизмеримы с вертикальными градиентами.

Выполненные для различных водохранилищ каскада исследования показали, что спектральная структура пространственных неоднородностей гидрофизических полей определяет распределение дисперсии по трем основным масштабам, где проявляются: анизотропные гидродинамические процессы, двумерно–изотропная турбулентность и трехмерно–изотропная турбулентность. Крупномасштабные анизотропные пространственные неоднородности в распределении температуры и электропроводности определяются приходом энергии к водоему на временных масштабах с суточным и синоптическим периодом, мезомасштабные неоднородности

родности – на временных масштабах менее суток и морфометрическими особенностями и трехмерно-изотропная турбулентность – от масштабов глубины водоемов до масштабов диссипации поступающей энергии. Мезонеоднородности, на фоне которых развиваются процессы турбулентного перемешивания, обеспечивают выравнивание гидрофизических характеристик по акватории водоемов и распространение загрязняющих веществ.

Наибольшая дисперсия в изменениях температуры и электропроводности по акватории водохранилищ наблюдаются в мае–июне, когда идет интенсивное поглощение солнечной радиации и максимальные значения имеет адвекция тепла с речным стоком.

3.4. Особенности энерго- и массообмена в районе сброса подогретых вод тепловых электростанций

Современные тепловые электростанции служат источником дополнительного тепла, поступающего в водосемы-охладители. Сброс теплых вод приводит к изотермии потока и формированию стратифицированных течений, возникающих под влиянием гравитационных сил при наличии разности плотностей. Гидравлическое и тепловое взаимодействие циркуляционного расхода тепловой станции и вод водоема зависит от расхода подогретых вод, морфологических особенностей участка водосбора, конструкции водосбросного сооружения и ряда других факторов. Наиболее характерны для водохранилищ-охладителей двухслойные потоки с разнонаправленным движением.

Результаты исследования в районе сброса подогретых вод Конаковской ГРЭС показали, что в зимний период при интенсивной сработке Иваньковского водохранилища и при пропуске весеннего половодья. Основная роль в перемещении вод принадлежит силе тяжести. Резко выражена турбулентность потока. Вертикальные температурные градиенты отсутствуют, но резко выражены горизонтальные градиенты (рис. 3.6).

При наполнении водохранилища до НПУ и общим прогревом вод до 8–11 °С температура сбросных вод повышается до 18–23 °С. Изменяется плотностное соотношение между сбрасываемыми водами и водами водохранилища. Возникает слой темпера-

турного скачка и скачка плотности, который лежит на глубине от 1.5 до 4 м. Наличие в потоке устойчивого расслоения плотности уменьшает турбулентное перемешивание в вертикальной плоскости. В связи с этим четко выраженное турбулентное перемешивание и изотермия наблюдаются лишь в верховьях залива в непосредственной близости от водослива.

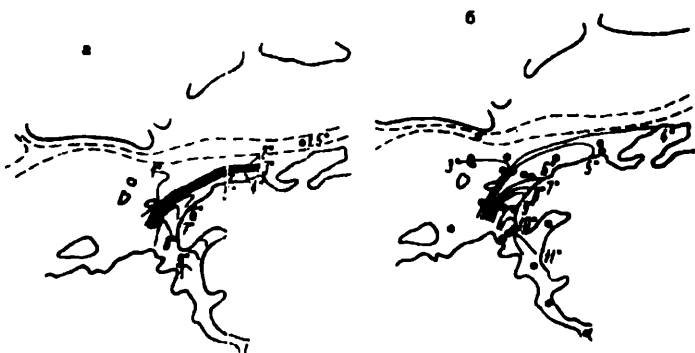


Рис. 3.6. Распределение температуры воды на глубине 0.5 м 17.04.1970 (а) и 20.04.1970 (б) в районе сброса подогретых вод Конаковской ГРЭС.

В результате неравномерного распределения плотности, поддерживаемого непрерывным поступлением теплых вод, в заливе создается плотностная циркуляция с разнонаправленным движением вод. При этом компенсационный поток холодных вод вызывается градиентом плотности, обусловленным различной глубиной залегания изобарических поверхностей. Вычисления показывают, что разность в глубине залегания изобарических поверхностей в верховьях залива и его устье достигает 7 мм, а в отдельных случаях 10 мм. Отсюда следует, что уклоны, вызванные градиентом плотности в заливе, имеют тот же порядок, что и уклоны, обусловленные горизонтальной составляющей силы тяжести (плотностным притоком теплых вод). При расходе тепловых вод в 25–30 м³/с, в 1967–68 гг. температурное расслоение прослеживалось до верховьев залива. С увеличением расхода до 60–80 м³/с двухслойный поток отмечался только в средней и нижней части залива (рис. 3.7). Следует отметить, что внутри установившегося клина

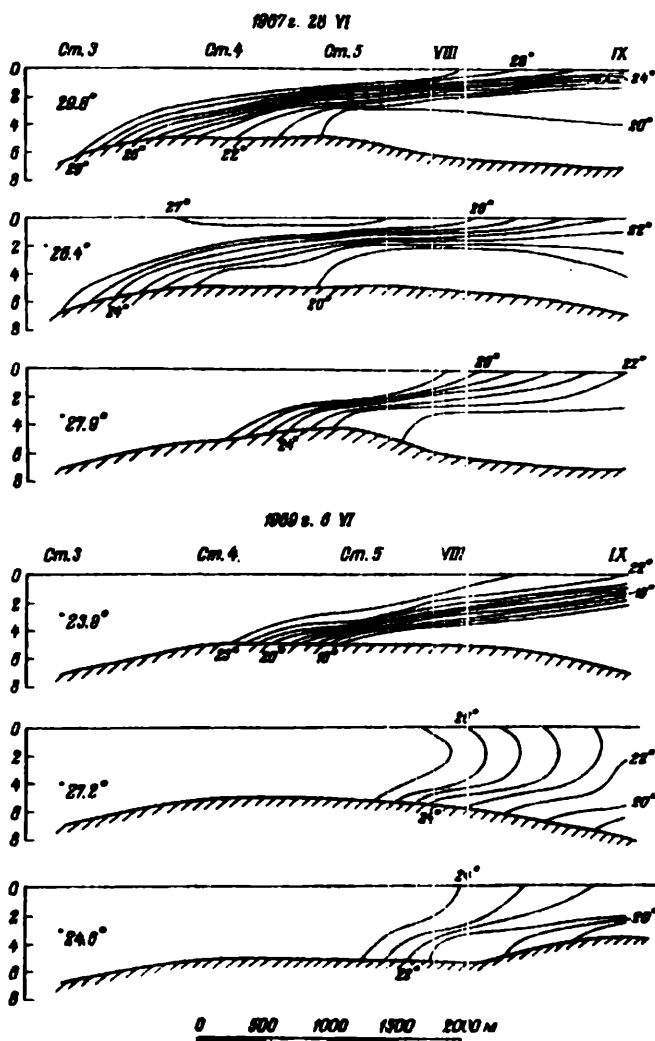


Рис. 3.7. Вертикальное распределение температуры воды
в Моложском заливе Ивановского водохранилища в 1967 и 1969 гг.

холодной воды общий поток приближается к нулю. Однако в отдельных его точках скорости компенсационного течения могут достигать 10–11 см/с [7, 36, 41, 42].

Длина клина холодной воды (см. рис. 3.7) определяется плотностным числом Фруда, показывающим отношение сил инерции, действующих в переслоенном потоке, к силам тяжести и плотностным числом Рейкольдса – отношением сил инерции к силам вязкости [36]. Оценка критических скоростей течения, при которых плотностное расслоение в заливе будет полностью разрушаться, показала, что при максимальных градиентах температуры они составляют 0.45–0.50 м/с.

3.5. Теплозапас и тепловой сток водохранилищ Волги

Одной из важнейших характеристик водоемов является теплозапас их водной массы. Обладая большой теплоемкостью, водная масса способна накапливать значительные количества тепла, тем самым уменьшая колебания температуры воды и стабилизируя гидрологические и гидробиологические процессы.

Нашими исследованиями показано, что теплозапас водоема определяется объемом его водной массы и ее термическим состоянием. В таких водохранилищах, как Ивановское, Угличское, Саратовское, объем которых после весеннего наполнения в течение всего безледного периода остается без существенных изменений, аккумулированное водной толщей тепло определяется ее температурой. Рассчитанные для Ивановского водохранилища коэффициенты корреляции между теплозапасом и средней температурой водной массы изменялись от 0.50 в мае до 0.92 в августе. В водохранилищах со значительными колебаниями уровня в течение безледного периода (Рыбинское, Куйбышевское) объем водной массы (как функция уровня) может играть решающую роль в величине теплозапаса и, особенно, в его межгодовых колебаниях.

Наиболее интенсивно накапливается тепло в водохранилищах в мае. Приращение теплозапаса за месяц по водохранилищам каскада за период с 1968 по 1985 гг. изменялось от 38 % в Угличском и Волгоградском, до 50 % в Рыбинском. В июне приращение теплозапаса уменьшалось и колебалось от 14 % в Ивановском до 28–29 % в Горьковском и Рыбинском.

Максимального значения теплозапас на всех водохранилищах достигал к 1 августа, однако за июль его приращение не превышало 11%. Максимальное приращение теплозапаса водной массы в мае обусловлено не только величиной радиационного баланса, которая меньше, чем в июне [13, 16] но и поступлением тепла за счет притока более теплых речных вод.

В течение августа теплозапас водохранилищ начинает уменьшаться. Наиболее интенсивно этот процесс идет на водохранилищах Верхней Волги, где снижение теплозапаса к 1 сентября составляет 17–22 %, на водохранилищах Средней Волги – от 13.9 до 14.4 %, Нижней Волги – от 10.6 до 10.8 %. В октябре во всех водохранилищах уменьшение теплозапаса составляет от 30 до 37 % (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Среднегогодовые значения теплозапасов водохранилищ Волги, 10^{15} Дж

Водохранилище	I.V	I.VI	I.VII	I.VIII	I.IX	I.X	I.XI	I.XII
Иваньковское (1968–85, 88–93)	39	77.3	92.6	94.12	75	43.7	14.0	–
Угличское (1968–85, 88–93)	40	80.7	100.7	104.8	86	53.5	16.5	–
Рыбинское (1968–85, 88–92)	294.2	1244	1720	1720	1328	690	292.6	45.8
Горьковское (1968–85)	132	442	642	697	613	363	101	–
Куйбышевское (1969–85)	822	3006	4110	4587	3900	2543	939	81
Саратовское (1971–85)	258	841	1061	1169	1039	724	308	33
Волгоградское (1968–85)	816	1910	2644	2812	2512	1754	839	232

холодной воды общий поток приближается к нулю. Однако в отдельных его точках скорости компенсационного течения могут достигать 10–11 см/с [7, 36, 41, 42].

Длина клина холодной воды (см. рис. 3.7) определяется плотностным числом Фруда, показывающим отношение сил инерции, действующих в переслоенном потоке, к силам тяжести и плотностным числом Рейкольдса – отношением сил инерции к силам вязкости [36]. Оценка критических скоростей течения, при которых плотностное расслоение в заливе будет полностью разрушаться, показала, что при максимальных градиентах температуры они составляют 0.45–0.50 м/с.

3.5. Теплозапас и тепловой сток водохранилищ Волги

Одной из важнейших характеристик водоемов является теплозапас их водной массы. Обладая большой теплоемкостью, водная масса способна накапливать значительные количества тепла, тем самым уменьшая колебания температуры воды и стабилизируя гидрологические и гидробиологические процессы.

Нашими исследованиями показано, что теплозапас водоема определяется объемом его водной массы и ее термическим состоянием. В таких водохранилищах, как Ивановское, Угличское, Саратовское, объем которых после весеннего наполнения в течение всего безледного периода остается без существенных изменений, аккумулированное водной толщей тепло определяется ее температурой. Рассчитанные для Ивановского водохранилища коэффициенты корреляции между теплозапасом и средней температурой водной массы изменялись от 0.50 в мае до 0.92 в августе. В водохранилищах со значительными колебаниями уровня в течение безледного периода (Рыбинское, Куйбышевское) объем водной массы (как функция уровня) может играть решающую роль в величине теплозапаса и, особенно, в его межгодовых колебаниях.

Наиболее интенсивно накапливается тепло в водохранилищах в мае. Приращение теплозапаса за месяц по водохранилищам каскада за период с 1968 по 1985 гг. изменялось от 38 % в Угличском и Волгоградском, до 50 % в Рыбинском. В июне приращение теплозапаса уменьшалось и колебалось от 14 % в Ивановском до 28–29 % в Горьковском и Рыбинском.

Максимального значения теплозапас на всех водохранилищах достигал к 1 августа, однако за июль его приращение не превышало 11% . Максимальное приращение теплозапаса водной массы в мас обусловлено не только величиной радиационного баланса, которая меньше, чем в июне [13, 16] но и поступлением тепла за счет притока более теплых речных вод.

В течение августа теплозапас водохранилищ начинает уменьшаться. Наиболее интенсивно этот процесс идет на водохранилищах Верхней Волги, где снижение теплозапаса к 1 сентября составляет 17–22 %, на водохранилищах Средней Волги – от 13.9 до 14.4 %, Нижней Волги – от 10.6 до 10.8 %. В октябре во всех водохранилищах уменьшение теплозапаса составляет от 30 до 37 % (табл. 3.1).

Таблица 3.1. Среднемноголетние значения теплозапасов водохранилищ Волги, 10^{15} Дж

Водохранилище	I.V	I.VI	I.VII	I.VIII	I.IX	I.X	I.XI	I.XII
Иваньковское (1968–85, 88–93)	39	77.3	92.6	94.12	75	43.7	14.0	–
Угличское (1968–85, 88–93)	40	80.7	100.7	104.8	86	53.5	16.5	–
Рыбинское (1968–85, 88–92)	294.2	1244	1720	1720	1328	690	292.6	45.8
Горьковское (1968–85)	132	442	642	697	613	363	101	–
Куйбышевское (1969–85)	822	3006	4110	4587	3900	2543	939	81
Саратовское (1971–85)	258	841	1061	1169	1039	724	308	33
Волгоградское (1968–85)	816	1910	2644	2812	2512	1754	839	232

Исследования многолетней изменчивости теплозапасов показали, что аккумуляция весенних вод в водохранилищах и сбросы более холодных зимних вод в нижние бьефы привели к тому, что температура воды в Волгоградском водохранилище, расположенном в зоне степей и полупустынь, в мае и июне в среднем на $0.8-2.4^{\circ}\text{C}$ ниже, чем на Ивановском водохранилище. В отдельные годы эти различия достигали 5.5°C [57, 59].

Со стоком Волги в Северный Каспий за безледный период вносится большое количество тепла. При этом зарегулирование естественного водного стока сгладило межгодовые колебания теплового стока и изменило его сезонное распределение. На незарегулированном участке Волги (г. Тверь) тепловой сток за 1956–1985 гг. изменялся в 4 раза, ниже створа Рыбинской ГЭС (г. Ярославль) – в 2.3, а на Средней и Нижней Волге изменения не превышали 1.8–2.0 раза.

Наибольший сдвиг в сезонном распределении теплового стока отмечен ниже створа Рыбинской ГЭС и составляет два месяца по сравнению с незарегулированным участком и Средней Волгой (в мае у г. Твери, в июле у г. Ярославля). Межгодовые колебания месячных значений теплового стока весьма значительны и определяются климатическими условиями конкретных лет.

Таким образом, зарегулирование стока Волги каскадом водохранилищ привело к существенному изменению термического режима на всем ее протяжении. В целом по каскаду увеличилась продолжительность ледовых явлений в среднем на 8–20 суток. На Нижней волге (с. Верхне-Лебяжье, г. Астрахань) наоборот, продолжительность ледостава сократилась на 18–21 сутки.

Для температурного режима всех водохранилищ каскада в период весенне-летнего прогрева характерны неустойчивая температурная стратификация и значительная пространственная изменчивость по акватории.

За счет аккумуляции весеннего стока и сброса более холодных зимних вод в период прохождения половодья среднемесячная температура воды в мае–июне в Волгоградском водохранилище ниже таковой на Верхней Волге.

Глава 4. ЭКОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ

4.1. Районирование водохранилищ с использованием статистических методов

Одним из возможных методов изучения пространственно-временной структуры полей различных характеристик (в том числе и биологических) в водоемах может служить районирование, основанное на классификации вертикалей, на которых проводились наблюдения. Комплексные исследования, выполненные на различных водохранилищах каскада (Иваньковское, Рыбинское, а также многолетние материалы по гидрохимии Куйбышевского водохранилища, представленные Л.А. Выхристюк) с достаточно большим числом ингредиентов, измеренных на вертикали (до 60), дали возможность использовать методы математической статистики и определить роль отдельных характеристик в формировании качества воды [54].

При автоматическом разбиении исходного многомерного множества чаще всего переходят с помощью различных методов к небольшому числу вторичных признаков, в координатах которых выделение классов упрощается. Для уменьшения размерности исходной системы признаков нами применен метод главных компонент. Полученные в результате преобразования естественные ортогональные функции определяются вариационной структурой исходного множества элементов.

В качестве меры сходства между станциями использовано взвешенное евклидово расстояние. Классы выделялись на основе кратчайшей связующей сети. Границы классов проводились так, чтобы максимальное расстояние между соседними точками внутри классов всегда было меньше, чем расстояние между ближайшими точками соседних классов.

Классификация точек наблюдений (станций) выполнялась в координатах первых шести собственных векторов, описывающих в сумме от 68 до 87 % исходной дисперсии. Исследования показали, что в Иваньковском водохранилище вес гидрохимических характеристик в исследуемом пространстве признаков меняется от сезона к сезону. Если весной типологическая структура водоема

определяется в основном биогенными элементами, то летом наряду с перманганатной окисляемостью, pH, содержанием O_2 , главными ионами заметную роль начинают играть биологические показатели: БПК, деструкция, интенсивность фотосинтеза, бактериальная продукция, содержание хлорофилла "А". В осенний период вновь наибольший вес имеют биогенные элементы, цветность. Кроме того, в летний период на качество классификации существенное влияние может оказывать асинхронность наблюдений на акватории водохранилища.

В классификации, учитывающей временную изменчивость исходных переменных, 23 станции образуют 8 классов различного объема. Классы $A_1 - A_8$ раскрывают типологическую структуру водохранилища, а их взаимное расположение отражает генетическую закономерность. При этом, типологическая последовательность классов по кратчайшей сети в основном отвечает географической (рис. 4.1). Коэффициент корреляции между типологическими и топографическими расстояниями достаточно высок (0.70). В то же время изменение качества воды от входа системы (верхний участок водохранилища) до выхода (приплотинный участок) имеет хорошо выраженный нелинейный характер [54].

Анализ таксономической структуры и ее изменений от года к году на 20-летнем отрезке времени существования Куйбышевского водохранилища позволил установить, что на затопленной пойме и бывшем русле внутриводоемные процессы протекают по-разному; скорость изменения на поперечных профилях водоема значительно выше, чем на продольном, что еще раз подтвердило установленное выше положение об анизотропии полей гидрофизических и гидрохимических характеристик.

Статистическое районирование может служить основой для планирования сети станций долговременных наблюдений за контролем качества воды. При этом минимальное число станций, необходимое для достаточно полного освещения водоема, будет равно числу статистически однородных районов. Поскольку в Иваньковском водохранилище было выделено 5 статистически однородных районов, характеризующих крупномасштабные изменения качества воды, то, очевидно, и число станций наблюдений должно быть равно 5. Наилучшим вариантом размещения сети

станций, обеспечивающим минимальную ошибку экстраполяции по площади, является расположение их в центрах этих районов. Статистический центр района – точка с координатами, равными средним значениям характеристик станций, входящих в данный район. Предложенная сеть станций может быть принята как близкая к рациональной для регистрации 35–45 переменных с ошибкой экстраполяции 10–15 % [54], в то же время для получения такой точности по ряду других используемых характеристик или для повышения точности экстраполяции и регистрации мезомасштабных изменений необходимо деление районов на подрайоны с последующим определением их статистических центров.

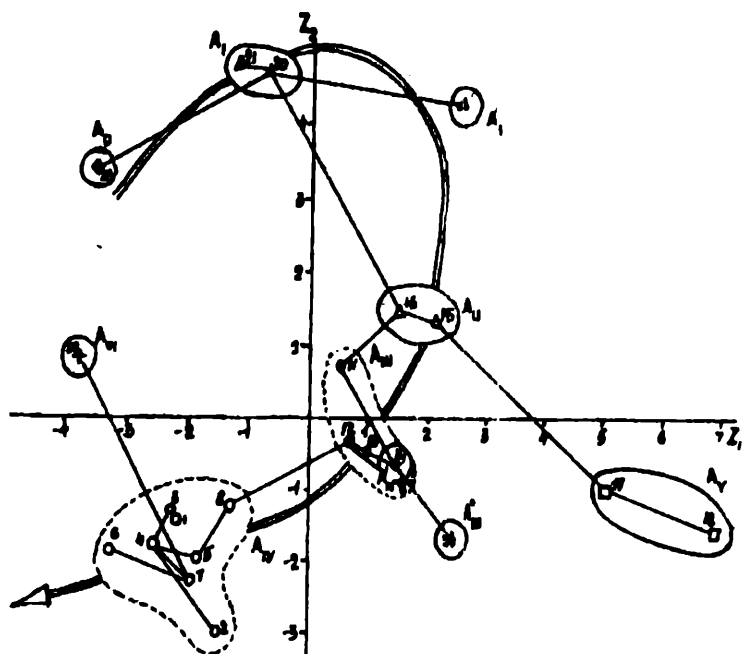


Рис. 4.1. Классы вод (A) в Ивановском водохранилище в координатах двух первых главных компонент 90-мерного пространства характеристик вод. Стрелка – направление изменений качества воды

4.2. Экологический подход к районированию водохранилищ

Несмотря на то, что районирование водоемов с применением статистических методов в целом ряде случаев дает наиболее объективную характеристику деления водоема по большому числу характеристик, на наш взгляд оно не позволяет выяснить вопрос о соответствии качества среды участка нормальному функционированию биоты, свойственной данному водоему. С экологических позиций именно реакция сообщества (или комплекса сообществ – подсистемы биоты) на антропогенное воздействие может дать ответ на вопрос о качестве водной среды и о допустимости данной нагрузки на водоем. При этом степень загрязнения определялась не по ПДК, а по наиболее лабильной части биотической компоненты – сообществам бактерио-, фито- и зоопланктона.

Для оценки состояния той или иной акватории показатели ее планктоценоза и среды сравнивались с **фоновыми значениями**.

Фоновое состояние, или экологическая норма, – это такие характеристики биоты и среды, при которых сохраняется естественная структура и функционирование экосистемы как уникального природного объекта, не меняются ее основные параметры, т.е. остаются неизменными видовой состав, структура сообществ и популяций, наблюдается стабильность естественных гидробиологических процессов, а их интенсивность не выходит за уровень многолетних колебаний.

Перемещение экосистемы из одного трофического, сапробиотического состояния в другое под действием сточных вод сопровождается усилением загрязнения и эвтрофирования вблизи источников выброса загрязняющих веществ. Отклонение параметров биоты и среды от фоновых значений свидетельствует об угнетении или стимуляции гидробиологических процессов на отдельных участках. При этом можно выделить три зоны: **токсическую** (зону угнетения), **эвтрофную** (зону стимуляции) и область **относительного экологического благополучия**.

Токсическая зона – участок акватории водоема, прилегающий к месту выпуска сточных вод, где нарушен видовой состав и основные гидробиологические процессы угнетены.

Эвтрофная зона – участок акватории вне токсической зоны, где происходит увеличение биоразнообразия и наблюдается интенсификация гидробиологических процессов, не свойственная данному водоему в его естественном состоянии.

В области относительного экологического благополучия значения показателей среды и биоты соответствуют фоновым [64, 65].

В токсической зоне снижается количество фито- и зоопланктона, уменьшается интенсивность фотосинтеза, отмирают зоопланктеры-олигосапробы. В то же время развиваются специфические группы бактериопланктона, среди которого количество сапрофитов и нефтеокисляющих бактерий возрастает на 3–5 порядков (рис. 4.2). Размеры токсической зоны в зависимости от сезона и водности года существенно изменяются. В наиболее напряженный летний период площадь токсической зоны на Иваньковском и Рыбинском водохранилищах составляет около 15 км², однако протяженность их существенно разная (7–12 км в Рыбинском и 25–30 км в Иваньковском водохранилищах). Весной и осенью, когда химические и биологические процессы самоочищения тормозятся низкими температурами, а водообмен увеличен, признаки токсического угнетения прослеживаются значительно дальше вниз по течению (рис. 4.3).

В эвтрофной зоне за счет разбавления и трансформации загрязняющих веществ интенсифицируется фотосинтез, возрастает биомасса фито- и зоопланктона, повышается разнообразие этих сообществ за счет сапробных видов. Площадь ее в Рыбинском водохранилище составляет 150–180 км², в Иваньковском 70–100 км².

Таким образом, рассмотренный метод районирования водохранилищ по широкому комплексу характеристик с использованием классификации станций наблюдений, с одной стороны, опирается на представление о разномасштабности пространственной и временной изменчивости полей гидрофизических и гидрохимических характеристик, а с другой позволяет объективно подойти к оптимизации сети наблюдений при контроле качества воды. Преимущество такого подхода заключается в четкой физической интерпретации спектральной структуры неоднородностей полей различных характеристик и выделении пространственно однородных зон в водоемах.

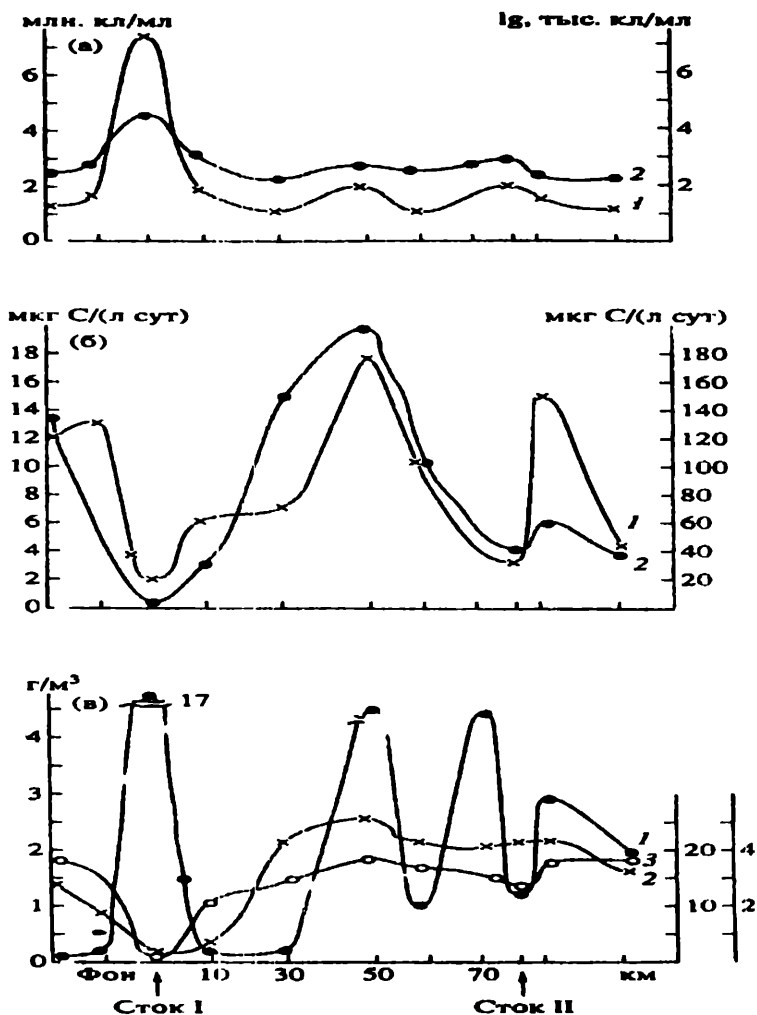


Рис. 4.2. Биологические показатели качества среды на участках Иваньковского подохранилища, удаленных на разные расстояния от места сброса сточных вод (I, II): а – общая численность бактерий (1) и сапрофитов (2). б – фотосинтез: естественная (1) и искусственная освещенность (2); в – биомасса зоопланктона в месте сброса сапробионтов (1), число видов зоопланктона (2) и индекс Шеннона (3)

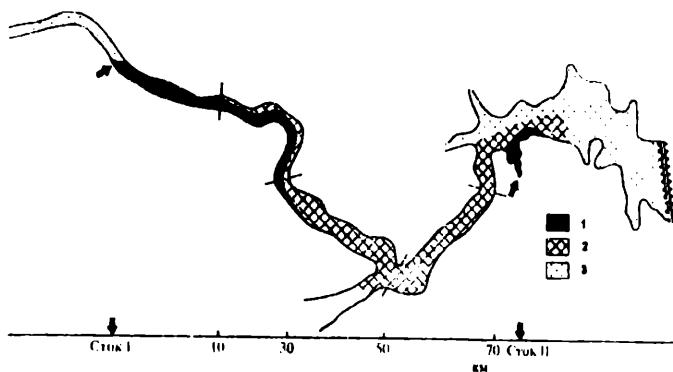


Рис. 4.3. Расположение токсической (1), евтрофной (2) зон и области относительного экологического благополучия (3) в Ивановском водохранилище

Для выявления зон загрязнения и оценки состояния участков водоемов в районах поступления сточных вод перспективным является использование части биоты фито-, бактерио- и зоопланктона, наиболее лабильной составляющей экосистемы. Структурные и функциональные нарушения в планктоценозе различны на разном удалении от мест сброса и зависят от параметров загрязнений, вносимых сточными водами.

Глава 5. ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ ВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

Особенности функционирования экосистем Волжских водохранилищ рассмотрены на примере экосистемы Рыбинского водохранилища. К анализу также привлечены материалы многолетних наблюдений за круговоротом биогенных элементов в водохранилищах Верхней Волги и данные по распределению гидробионтов.

5.1. Анализ особенностей функционирования экосистемы Рыбинского водохранилища

Для исследования особенностей функционирования экосистемы использована разработанная А.В. Леоновым [24, 26] экологическая модель, описывающая динамику органогенных элементов (C, N, P) и учитывающая воздействие природных и антропогенных факторов на экосистему водоема и различия в распределении химических и биологических характеристик по его акваториям.

Модель описывает внутригодовые изменения концентраций C_{ORG} , O_2 и соединений N, P, скорости процессов, ответственных за изменение концентраций веществ, внутренние и внешние потоки вещества в экосистеме водоема, время оборота всех исследуемых в модели химических и биологических компонентов. Фактически модель воспроизводит переходные процессы и описывает реакцию водной экосистемы на изменение условий среды обитания (водный режим, температура, суммарная солнечная радиация, биогенная нагрузка).

При выполнении модельных расчетов были использованы результаты наблюдений 1981 г. за изменением температуры воды, ее освещенности, водного режима, оценки биогенной нагрузки на водоем. По результатам моделирования рассчитана годовая динамика химических и биологических компонентов в плесах Рыбинского водохранилища, оценены внутренние и внешние потоки органических веществ и скорости продукционно-деструкционных процессов, а также региональные особенности функционирования экосистемы водохранилища.

Выявленные по результатам расчетов колебания концентраций биогенных веществ в целом соответствуют их изменениям, оцениваемым по осредненным данным наблюдений. Особенно ярко выражены изменения концентраций биогенных веществ на разных участках в весенний период. Согласно расчетам на 6–15 апреля отмечается снижение концентраций тех биогенных веществ, которые активно вовлекаются планктоном в оборот: фосфатов и нитратов. Однако через 10–20 суток за счет процессов горизонтального переноса, поступлений из внешних источников и за счет внутреннего круговорота (или рециклинга) веществ концен-

рации указанных компонентов в водной среде возрастают (рис. 5.1). Снижение концентраций биогенных веществ (даже до нулевых значений) не означает прекращения процессов, связанных с активностью гидробионтов, а лишь свидетельствует о том, что в этот период резко меняются равновесные условия сохранения запасов биогенных элементов из-за колебаний внешних (поступление) и внутренних (потребление и поступление) потоков субстанций [12, 24].

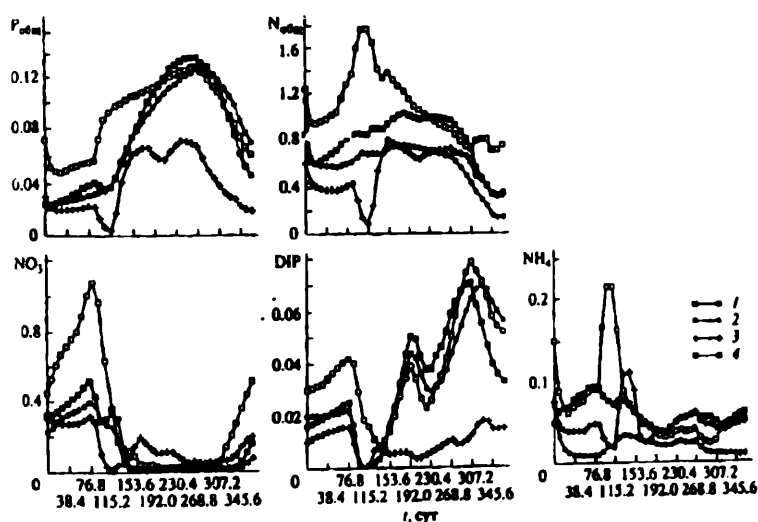


Рис. 5.1. Изменение расчетных значений концентраций (мг/л) биогенных элементов для Волжского (1), Главного (2), Моложского (3) и Шексминского (4) плесов Рыбинского водохранилища.

В ходе анализа расчетных данных была получена информация об особенностях биотрансформации компонентов, а также о формирующихся балансах биогенных веществ и скоростях продукционно-деструкционных процессов по отдельным плесам водохранилища. Балансовые расчеты показали, что в Волжском плесе экосистемой теряется фосфора больше, чем поступает в нее. В других плесах наблюдается обратное, и поступление фосфора не балансируется по внешним потерям. Следовательно, значительное количе-

ство фосфора в экосистеме водоема участвует в круговороте, оставаясь на невысоком уровне. Этим объясняются относительно небольшие значения расходных составляющих внешнего баланса фосфора в экосистеме водоема. Для азота тенденции перераспределения в отдельных плесах оказываются близкими: потери азота во всех четырех плесах выше его поступления в водную среду.

Расчеты показали, что количество образующегося за счет активности гидробионтов детрита также меняется по акватории водоема. При этом, основное количество детритного азота образуется фитопланктоном и бактериями, а детритного фосфора в большей мере связано с активностью зоопланктона. Образующиеся в водной среде в процессах биотрансформации соединения азота и фосфора отражают реакцию экосистемы на поступление в нее веществ из внешних источников. Это внутренняя биогенная нагрузка экосистемы, которая оказывается довольно весомой прибавкой к поступающим из внешних источников органогенным субстанциям. Внутренняя биогенная нагрузка экосистемы за счет циркуляции элементов в экосистеме водоема практически везде превышает их поступление из внешних источников [26].

Таким образом, использование модели дало возможность оценить все важнейшие внутренние потоки преобразования вещества и оценить величины полной годовой продукции организмов. Расчеты показали, что в экосистеме водохранилища по всем плесам скорости продукции водорослей (фитопланктона и макрофитов) выше продукции бактерий и зоопланктона. Полученные оценки отражают особенности пространственного распределения биогенной нагрузки (по N и P), а также характеризуют специфику условий, благоприятствующих развитию рассмотренного при моделировании сообщества планктонных организмов по плесам водохранилища.

Недоступность для гидробионтов основной фракции органических соединений азота при низких концентрациях минеральных его форм обусловили несогласованность трофических индексов, рассчитанных для Угличского и Горьковского водохранилищ по общему азоту и другим параметрам, рекомендуемым для определения трофического статуса водоема. Это обстоятельство не позволяет использовать такие показатели, как содержание общих форм азота и фосфора, в качестве исходных данных для оценки

трофического статуса волжских водохранилищ, хотя и дает полезную информацию о недоиспользованности или непригодности для гидробионтов некоторых соединений N и P, присутствующих в водоеме [49].

Балансовые расчеты дали возможность оценить биогенно-удерживающую способность грунтов водохранилищ, равную процентному отношению годовой величины аккумуляции элемента в донных отложениях к общему его приходу. Для водохранилищ Верхней Волги она составляет 10 и 4 % для азота и 35 и 20 % для фосфора в Иваньковском и Угличском водохранилищах и 33 для азота и 67 % для фосфора – в Рыбинском водохранилище, то есть водохранилища обладают потенциальной способностью удерживать загрязнения, поступающие с водосбора. Одной из причин различия коэффициента удержания биогенных элементов являются различия в интенсивности их водообмена [12, 26].

Результаты исследований свидетельствуют, что в настоящее время основные водные массы водохранилищ Верхней Волги могут быть отнесены к водам удовлетворительной чистоты. Экосистема Волги пока справляется как с вносимым, так и с продуцируемым органическим веществом за счет повышения напряженности процессов его трансформации. Однако самоочищающая способность водоемов ограничена. Чтобы сохранить относительную сбалансированность волжской экосистемы и предотвратить ухудшение качества воды, необходимо проведение оздоровительных мероприятий на водосборе рек бассейна, в том числе и на так называемых "малых" реках, играющих существенную роль в формировании качества воды.

5.2. Гидрологические процессы и распределение гидробионтов в водохранилищах

Изменение энерго- и массообмена в Волге определило не только новые условия формирования гидрологических процессов, но и коренным образом изменило условия жизнедеятельности и распределение гидробионтов.

К основным гидрологическим характеристикам, определяющим неоднородность пространственного распределения планктонных организмов относятся: морфометрические особенности

водоемов, интенсивность водообмена водохранилищ и их отдельных участков, особенности формирования, структура и динамика водных масс и связанные с ними характеристики термического, гидрооптического, газового режима и другие показатели.

В Рыбинском водохранилище зимой скопления зоопланктона с высокой биомассой образуются главным образом в наиболее глубоких участках Главного плеса – в котловинах затопленных озер и руслах рек Мологи и Шексны. Эти участки характеризуются слабой гидродинамической активностью водной массы (водообмен на порядок меньше, чем в период открытой воды), повышенными значениями температуры, максимальным илонакоплением. Места скопления зоопланктона из года в год стабильны и существуют в течение всей зимы, достигая наибольшей численности к концу периода зимней стагнации. Их горизонтальные перемещения отсутствуют, наблюдаются лишь небольшие вертикальные подвижки, связанные с возникающим в течение зимы дефицитом кислорода. Размеры зимних скоплений относительно невелики и соответствуют ширине затопленных русел (рис. 5.2). По длине они могут достигать нескольких километров. Биомасса зоопланктона в скоплениях составляет в среднем 0.5–10, иногда до 40–60 г/м³ [60, 78].

Как было показано ранее, водные массы водохранилищ весной характеризуются наибольшей степенью неоднородности по гидрофизическим и гидрохимическим показателям. Зимние скопления зоопланктона в период активного весеннего ледотаяния и наполнения водохранилищ разрушаются, и организмы рассеиваются вследствие значительно увеличивающейся интенсивности водообмена за счет стоковых и частично ветровых течений. Менее прозрачные с повышенным содержанием взвешенных веществ, слабоминерализованные воды половодья, поступающие по основным притокам, не соответствуют экологическому оптимуму зимних видов зоопланктона и акватории занятые ими сокращаются. В речных плесах и на мелководьях вследствие более интенсивного прогрева появляются представители летних видов. Сроки смены зимних форм зоопланктона на весенние и ареалы распространения зимнего сообщества в зависимости от гидрометеорологических условий года могут существенно различаться.

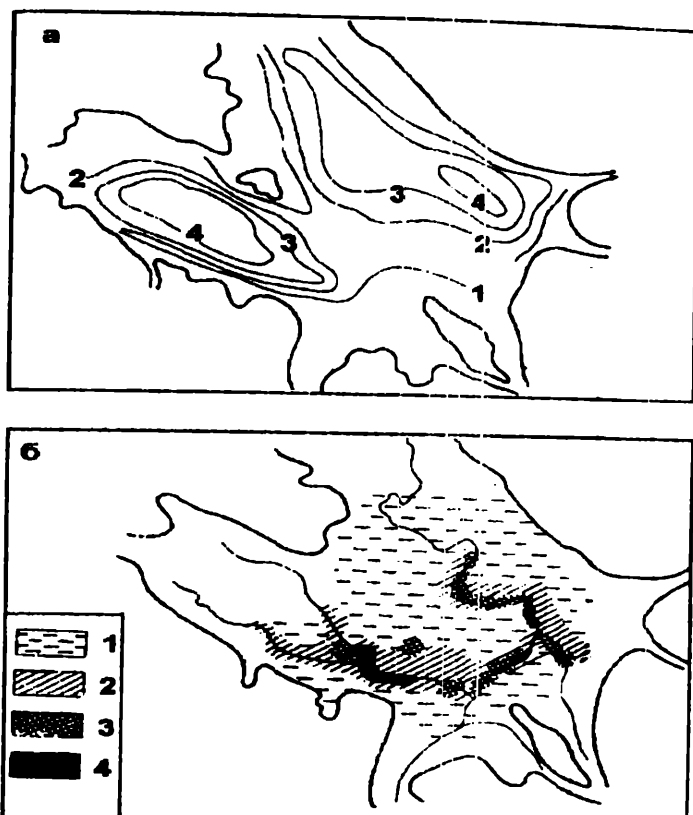


Рис. 5.2. Схема распределения температуры поверхности грунта, °С, в марте (а) и придонных скоплений зоопланктона в зимний период (б). Биомасса: 1 — до 0.1; 2 — 0.11–0.20; 3 — 0.21–0.50; 4 — 0.51–1.0 г/м³

Однако районы с максимальной плотностью холодолюбивого зимнего сообщества всегда располагаются в центре наиболее холодной, прозрачной и сильноминерализованной зоны (рис. 5.3). Комплексные исследования с применением данных аэрокосмических съемок и контактных наблюдений показали, что в весенний период и распределение фитопланктона связано со структурой водных масс [78].

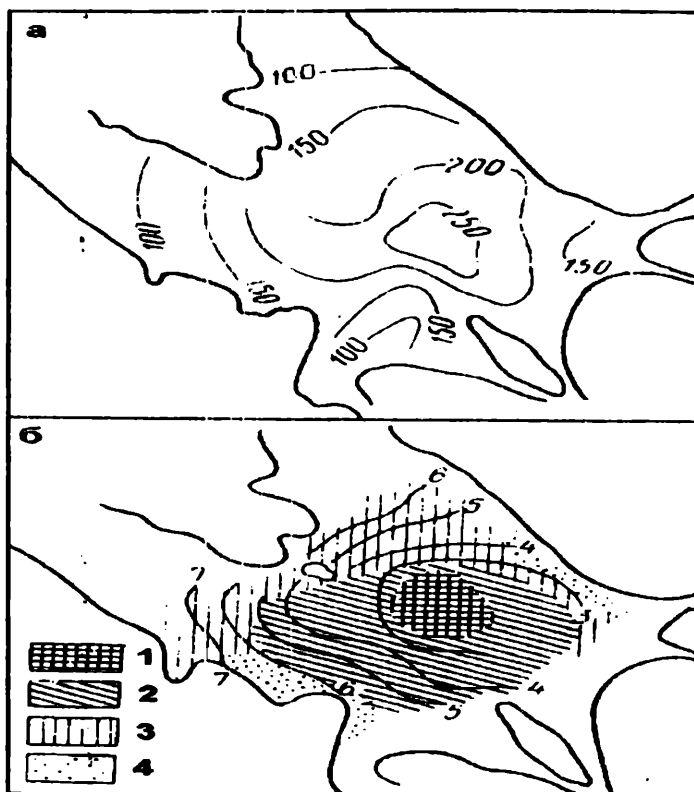


Рис. 5.3. Распределение прозрачности, см (а), температуры и плотности зоопланктона (б) в мае 1979 г. Численность зоопланктона: 1 — >10, 2 — 5-10, 3 — 1-5, 4 — < 1 тыс. экз/м³

В летне-осенний период главными факторами, определяющими условия формирования, динамику водных масс и функционирование биотических компонентов экосистемы служат крупномасштабные гидродинамические процессы (общая циркуляция вод водоема, волнение). Образование скоплений планктона в ядрах циркуляционных зон обусловлено действием центробежных сил и минимальными скоростями интегрального переноса (0.1-3.3 см/с), что способствует концентрации планктонных орга-

низмов. При преобладающих в безледный период на Рыбинском водохранилище ветрах северо-западного направления и относительно устойчивой системе вихревых образований, их ядра служат постоянными зонами аккумуляции биомассы в водохранилище, обусловленными скоплениями фито- и зоопланктона, взвешенных частиц и повышенной седиментацией, в связи с минимальными скоростями интегрального переноса. Относительное постоянство районов с высокой биомассой зоопланктона не только в ядрах крупных циркуляционных образований, несмотря на значительную подвижность водной массы, обусловлено и суточной вертикальной миграцией планктона. Как показали выполненные нами расчеты, при наличии двухслойного течения на большей части акватории Рыбинского водохранилища и вертикальных миграций планктона фактическое его перемещение в течение месяца не превышало 7–9 км для каждого из пяти различных районов, в которых, по данным гидробиологических съемок в июле 1965 г., находились летние скопления зоопланктона [4].

Наибольшая неоднородность наблюдается при длительной штилевой погоде. В такие периоды проявляются локальные трофические особенности, а размножение форм идет особенно интенсивно в мелкомасштабных термических неоднородностях за счет температурного оптимума, что в свою очередь обеспечивает увеличение плотности скоплений. Размеры пятен имеют те же характеристики, что и термические неоднородности, а их возникновение связано с турбулентным переносом тепла и конвективным перемешиванием и подчинено тем же законам распределения, что и неоднородности полей гидрохимических характеристик.

Изучение горизонтального распределения доминирующих видов ветвистоусых, образующих летом основу биомассы, показало, что районы повышенной плотности отдельных видов не совпадают. Это связано не только с гидрологическими процессами, условиями питания и гидродинамикой водоема, но и с изменяющимся качеством воды. Отмечается приуроченность ряда видов зоопланктона к западной, наименее эвтрофированной и загрязненной части Главного плеса.

Гидролого-гидробиологические исследования, выполненные на Средней и Нижней Волге в 1990 и 1991 гг. под руководством и при участии автора показали, что развитие водорослей в водохра-

нилищах испытывает комплексное воздействие факторов внешней среды и, как правило, мало зависит от влияния отдельно взятого параметра [65, 78, 82, 83]. По результатам корреляционного анализа в водохранилищах Волги концентрации хлорофилла "а" (Хл"а"), за редкими исключениями, достоверно связаны лишь с содержанием O_2 , а также степенью насыщения воды O_2 , что свидетельствует о заметной роли фотосинтетических процессов в формировании газового режима. При интенсивно идущем фотосинтезе с содержанием Хл"а" связаны и значения рН воды, сдвиг которых в щелочную сторону происходит за счет изменения баланса O_2 и углекислоты. Температура воды в летний период практически не влияет на развитие фитопланктона в каждый отдельный момент, когда в водоеме сформировалось сообщество, адаптированное к конкретным условиям. Роль фитопланктона в формировании подводного светового режима прослеживалась лишь в августе 1991 г., когда была получена достоверная отрицательная корреляция содержания Хл"а" с прозрачностью воды. Глубина видимости белого диска зависит также от цветности воды и суммарного содержания взвешенных веществ, которое само тесно связано с концентрацией пигмента. Значения электропроводности воды, характеризующие общую минерализацию, коррелирует с содержанием Хл"а" лишь в отдельные периоды. В то же время комплексное воздействие исследованных параметров существенно влияет на развитие фитопланктона и определяет значительную долю изменчивости Хл"а" в водохранилищах каскада. Коэффициенты множественной корреляции между содержанием Хл"а" и набором исследованных гидрологических характеристик высоки (0.92 в июне и 0.68 в августе).

Результаты классификации станций наблюдений и районирование водохранилищ Средней и Нижней Волги показали, что в начале лета, когда в водохранилищах еще сохраняется весенняя неоднородность водных масс, большинство станций образуют отдельные классы с контрастными характеристиками (рис. 5.4). Лишь немногие станции Средней Волги объединяются в классы для которых характерно снижение содержания Хл"а" вниз по течению на фоне увеличения температуры, прозрачности и электропроводности, а также снижение цветности и содержания O_2 .

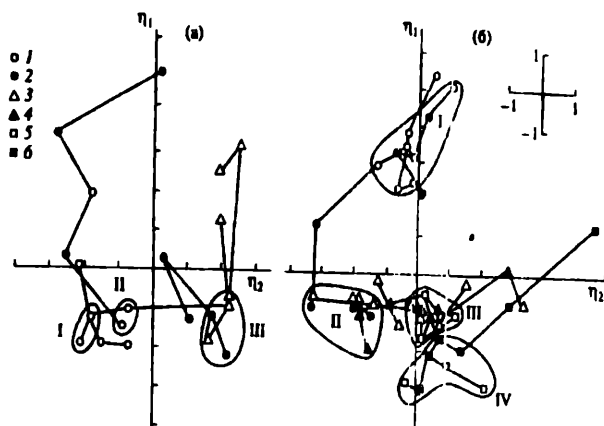


Рис. 5.4. Классы станций (I – IV) на водохранилищах Средней и Нижней Волги в координатах двух первых компонент

В период сформировавшегося летнего сообщества (август), 75 % станции наблюдений сгруппировались в 4 класса, каждый из которых включает в себя 7–10 точек. Выделенные классы характеризуются чередованием относительно высокого и низкого содержания Хл "а", плавным увеличением прозрачности и температуры, а также снижением цветности. Расположение выделенных классов соответствует географической зональности. Выполненный анализ показал также, что максимальное обилие и наибольшая горизонтальная неоднородность в распределении фитопланктона наблюдается в водохранилищах со сложной гидрологической структурой. На фоне крупных районов в период летнего максимума фитопланктона выделяются локальные участки со значительными межгодовыми различиями всех исследованных параметров. Это, в первую очередь, приустьевые участки крупных притоков, подвергающиеся повышенной антропогенной нагрузке, а также нижние и верхние бьефы отдельных гидроузлов со специфическими условиями гидродинамического режима.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Научные исследования водохранилищ начались сравнительно недавно. Внутренняя противоречивость этих техногенных водоемов, сложные закономерности их развития, существенные и многосторонние изменения, вносимые в природу, обуславливают необходимость обобщения накопленных значений о различных сторонах их жизни. Используемый в настоящей работе подход, базирующийся на анализе закономерностей характеристик энерго- и массообмена, позволил решить ряд принципиально важных задач в приложении к водным экосистемам это прежде всего:

1. Наличие периодов разной водности за время эксплуатации водохранилищ, что отразилось на уровнях их наполнения и интенсивности водообмена, функционировании биотических компонентов экосистемы.

2. Показано, что основными факторами, генерирующими динамические процессы в водохранилищах и обуславливающими их пространственно-временную изменчивость, служат приток солнечной радиации, межгодовые и сезонные изменения в стоке рек, синтетическая энергия ветра, суточное и недельное регулирование стока через гидросооружения и морфометрические характеристики водоемов.

3. В водохранилищах наблюдается три основных типа изменчивости, относящихся к макро-, мезо- и микромасштабам; макромасштабная изменчивость обусловлена климатическими факторами, вызывающими изменения в речном стоке и внешнем водообмене; мезомасштабная – внутрисезонными синоптическими процессами и имеет периоды от нескольких суток до нескольких часов; микромасштабная – подчиняется законам турбулентного обмена и короткопериодных внутренних волн.

4. Аккумуляция весенних вод в водохранилищах и сбросы более холодных зимних вод в нижние бьефы приводят к тому, что средние температуры водной массы в мае и июне на Верхней Волге выше, чем на Нижней.

5. Рассмотренные методы районирования водохранилищ по широкому комплексу характеристик опираются на представление о разномасштабной пространственной и временной изменчивости полей гидрофизических и гидрохимических характеристик и по-

звolyют объективно подойти к оптимизации сети наблюдений при контроле качества воды. Преимущество такого подхода заключается в четкой физической интерпретации спектральной структуры неоднородностей полей различных характеристик и выделении пространственно однородных зон в водоемах.

Для выявления зон загрязнения и оценки экологического состояния участков водоемов в районах поступления сточных вод перспективным является использование в качестве индикаторов части биоты: фито-, бактерио- и зоопланктона, наиболее лабильной составляющей экосистемы. Структурные и функциональные нарушения в планктоценозе различны на разном удалении от места сброса и зависят от параметров загрязнений, вносимых сточными водами.

6. Экосистема Волги пока справляется как с вносимым, так и продуцируемым органическим веществом за счет повышения напряженности процессов его трансформации. Однако самоочищающая способность водоемов ограничена. Почти на каждом водохранилище имеются участки с высоким уровнем экологической опасности (зон риска). Продолжающее поступление загрязняющих веществ и их накопление в водоемах способствует продвижению гидробиологических процессов в направлении ухудшения экологической ситуации уже загрязненных районов до состояния катастрофы и в направлении охвата загрязнением других акваторий. Чтобы сохранить относительную сбалансированность волжской экосистемы и данный уровень качества воды, необходимо проведение оздоровительных мероприятий на водосборе рек бассейна и улучшение качества воды, поступающей из точечных источников загрязнения.

7. Изменение характеристик энерго- и массообмена в Волге определило не только новые условия формирования гидрологических процессов, но и коренным образом изменило условия жизнедеятельности и распределения гидробионтов. К основным гидрологическим характеристикам, определяющим неоднородность пространственного распределения планктонных организмов, относятся: морфометрические особенности водоемов, интенсивность водообмена и характер общей циркуляции вод, особенности формирования, структура и динамика водных масс.

8. Задачей дальнейших исследований в области изучения и регулирования энерго- и массообмена в природной среде автор видит в дальнейшем выявлении спектральной структуры интегральных характеристик экосистем и построении типовых моделей на бассейновом уровне в масштабах от локального (бассейны малых рек) до крупных водохозяйственных систем, что позволит решить ряд практически важных задач, связанных с оптимизацией водо- и природопользования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А.Б., Поддубный А.Г. Водохранилища Волжско-Камского каскада ГЭС и пути улучшения их экологического состояния // Изв. АН СССР. 1994. № 3. С. 38-48.
2. Антропогенное влияние на крупные озера Северо-Запада СССР // Л.: Наука, 1981. С. 68-83.
3. Архангельский В.А. Расчеты неустановившегося движения в открытых водотоках. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1947. 231 с.
4. Бакастов С.С., Литвинов А.С. Опыт расчета горизонтального переноса сообществ планктона // Биология и физиология пресноводных организмов. Л.: 1971. С. 217-223.
5. Буторин Н.В., Литвинов А.С. О течениях в Рыбинском водохранилище // Биологические аспекты изучения водохранилищ. М.-Л. 1963. С. 270-302.
6. Буторин Н.В., Литвинов А.С. Расчет коэффициентов турбулентного обмена в Рыбинском водохранилище // Биологические и гидрологические факторы местного перемещения рыб. Л.: 1968. С. 250-259.
7. Буторин Н.В., Литвинов А.С. Особенности термического режима водохранилища-охлаждителя крупной тепловой электростанции // Гидрология озер и водохранилищ. Ч. 2. Водохранилища. М.: Изд-во МГУ, 1975. С. 134-142.
8. Буторин Н.В., Курдина Т.С., Бакастов С.С. Температура воды и грунтов в Рыбинского водохранилища. Л.: Наука, 1982. 224 с.

9. Горизонтальная циркуляция вод в Рыбинском водохранилище и возможные ее изменения при перераспределении стока / Н.В. Буторин, А.С. Литвинов, И.Ф. Фомичев, С.А. Поддубный // Экологические исследования водоемов Волго-Балтийской и Северо-Двинской водных систем Л.: 1982. С. 150–167.
10. Волга и ее жизнь // Л.:Наука. 1978. 350 с.
11. Волгоградское водохранилище. Л.:Гидрометеиздат. 1978. 84 с.
12. Гапеева М.В., Разгулин С.М., Литвинов А.С. Баланс биогенных элементов и ионов в Рыбинском водохранилище // Гидрохимические исследования волжских водохранилищ. Рыбинск, 1982. С. 81–91.
13. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги // Л.:Гидрометеиздат, 1975. 291 с.
14. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ. Куйбышевское и Саратовское водохранилища. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 270 с.
15. Гирс А.А. Основы долгосрочных прогнозов погоды. Л.: Гидрометеиздат, 1960.
16. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1986. Ч.1. Т.1. Вып. 23. 628 с.
17. Грушевский М.С. Некоторые вопросы неустановившегося движения воды в естественных руслах и водоемах // Тр. ГТИ. 1965. Вып. 121.
18. Демин Ю.Л., Ибраев Р.А. Численный метод расчета течений и уровня в многосвязных областях океана: Препринт № 183. М.: ОВМ АН СССР. 1988.
19. О роли бароклинных эффектов в динамике Рыбинского водохранилища / Ю.Л. Демин, И.О. Ахвердиев, А.С. Литвинов, С.А. Поддубный // Водные ресурсы. 1991. № 4. С. 55–65.
20. Дружинин И.П., Коноваленко З.П. и др. Речной сток и геофизические процессы. М.:Изд-во «Наука», 1966.
21. Знаменский В.А. Гидрологические процессы и их роль в формировании качества воды. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 248 с.
22. Кондрацова О.Ф. // Информ. бюл. ИБВВ АН СССР. 1985. № 65.С. 49.
23. Куйбышевское водохранилище. Л.:Гидрометеиздат. 1978. 84 с.

24. Леонов А.В., Абросов Н.С., Николаев В.М. Математическая модель совместной трансформации соединений углерода, азота, фосфора и режима кислорода во взаимосвязанных водоемах повышенной трофности // Водные ресурсы. 1994. Т. 21, № 5. С. 513.
25. Литвинов А.С. Гидрологическая характеристика Сбросного плеса Рыбинского водохранилища // Динамика водных масс водохранилищ. М.–Л., 1965. С. 56–64.
26. Леонов А.В., Литвинов А.С., Разгулин С.М. Анализ особенностей функционирования экосистемы Рыбинского водохранилища с помощью математической модели // Водные ресурсы. 1996. Т. 23, № 6. С. 739–753.
27. Литвинов А.С. Некоторые данные о ветровых течениях в Рыбинском водохранилище // Гидрометеорологический режим Верхне-Волжских водохранилищ. Л.:1966. С.50–60.
28. Литвинов А.С. О распространении волн попусков в нижнем бьефе Угличской ГЭС // Информ. бюлл. Биология внутренних вод. 1968. № 2. С. 26–30.
29. Литвинов А.С. Влияние попусков воды Угличской и Рыбинской ГЭС на режим течений в Рыбинском водохранилище // I конференции по изучению водоемов бассейна Волги: Тез. докл. Тольятти, 1968. С. 90–92.
30. Литвинов А.С. Об измерениях течений в водохранилищах самописцами БП2-р // Биологические и гидрологические факторы местных перемещений рыб в водохранилищах. Л., 1968. С. 259–269.
31. Литвинов А.С., Бакулин К.А. Динамика вод Волжского плеса Рыбинского водохранилища в зимний период // Химизм внутренних водоемов и факторы их загрязнения и самоочищения. Л.: 1968. С. 240–259.
32. Литвинов А.С. О ветровых течениях в Белом озере // Информ. бюлл. Биология внутренних вод. 1969. № 4. С. 35–39.
33. Литвинов А.С. Влияние Рыбинской ГЭС на режим течений верхнего бьефа // Информ. бюлл. Биология внутренних вод. 1970. № 5. С. 77–80.
34. Литвинов А.С. Опыт расчета установившихся ветровых течений в большом мелководном водоеме // Органическое вещество и элементы гидрологического режима Волжских водохранилищ. Л., 1972. С. 186–192.

35. Литвинов А.С. О формировании и устойчивости слоя скачка в Мошковичском заливе Ивановского водохранилища // Информ. бюлл. Биология внутренних вод. 1979. № 19. С. 56–59.
36. Литвинов А.С. Формирование, структура и флуктуации термоклина в Ивановском водохранилище // Факторы формирования водных масс и районирование внутренних водоемов. Л., 1974. С. 120–147.
37. Литвинов А.С. Короткопериодные колебания термоклина в Машковичском заливе Ивановского водохранилища // Информ. бюлл. Биология внутренних вод. 1974. № 23. С. 53–56.
38. Литвинов А.С. Об определении средних скоростей течения в нижних бьефах ГЭС // Информ. бюлл. Биология внутренних вод. 1975. № 25. С. 53–56.
39. Литвинов А.С. О некоторых статистических характеристиках течений в Ивановском водохранилище // Информ. бюлл. Биология внутренних вод. 1977. № 34. С. 64–67.
40. Литвинов А.С. Структура течений верховолжских водохранилищ // Гидрологические и гидрохимические аспекты изучения водохранилищ. Борок, 1977. С. 18–30.
41. Литвинов А.С. О расчете длины и глубины клина холодной воды в Мошковичском заливе Ивановского водохранилища // Информ. бюлл. Биология внутренних вод. 1979. № 19. С. 56–59.
42. Литвинов А.С. Временная и пространственная изменчивость поля температуры в водохранилищах // Вторая Всес. конф. "Динамика и термика рек, водохранилищ, эстуариев": Тез. докл. М., 1984. С. 54–55.
43. Литвинов А.С. Временная и пространственная изменчивость поля температуры в водохранилищах // Гидрологические процессы в реках и водохранилищах. М., 1985. С. 279–283.
44. Литвинов А.С. Структура и изменчивость поля температуры в водохранилищах // Труды V Всесоюзного гидрологического съезда. Л., 1990. Т. 8. С. 289–294.
45. Литвинов А.С. Структура течений и турбулентный обмен в водохранилищах Верхней Волги // III Всесоюзное совещание "Динамика и термика рек, озер и водохранилищ": Тез. докл. М.: 1989. С. 75–76.
46. Литвинов А.С. Гидрологические процессы и распределение гидробиоты в Рыбинском водохранилище // Междунар. конф. "Лимноло-

гия водохранилищ и качество воды": Тез. докл.. Чешске-Будевицы, 1992. С. 215-216.

47. Литвинов А.С. Многолетняя и сезонная изменчивость водообмена водохранилищ Волжского каскада // Междунар. конф. "Экологические проблемы бассейнов крупных рек": Тез. докл. Тольятти, 1993 С. 93-94.
48. Литвинов А.С., Бутсрин Н.В. О течениях и турбулентном обмене вод в водохранилищах // Acta Hydrophysica. Bd. XXV. Н 1-2. Berlin, 1980. Р. 61-77.
49. Литвинов А.С., Бутсрин Н.В., Трифонова Н.А. Абиотические факторы формирования качества воды верхневолжских водохранилищ // Структура функционирования пресноводных экосистем. Л., 1988 С. 24-42.
50. Литвинов А.С., Законнова А.В. Водный баланс, водообмен и режим уровня Чебоксарского водохранилища в первые годы заполнения // Водные ресурсы. 1936. № 3. С. 69-76.
51. Литвинов А.С., Законнова А.В. Характеристика гидрологических условий в Чебоксарском водохранилище в первые годы заполнения // Водные ресурсы. 1994. Т.21, № 3. С. 365-374.
52. Литвинов А.С., Поддубный С.А. О горизонтальной циркуляции вод в оз. Плещеево // Функционирование озерных экосистем. Рыбинск. 1983. С. 13-18.
53. Литвинов А.С., Фомичев И.Ф. Водообмен и динамика вод в водохранилищах // Acta Hydrophysica. BD XXVII. Н 3/4. Berlin, 1982. С. 315-328.
54. Литвинов А.С., Кожара В.Л., Рошупко В.Ф. Типологическая структура водной толщи Ивановского водохранилища. Деп. в ВИНТИ 1980, № 3569-80..
55. Литвинов А.С., Цельмович О.Л. Водный баланс и водообмен Шекснинского водохранилища // Экологические исследования водоемов Волго-Балтийской и Северо-Двинской водных систем. Л., 1982. С. 150-16.
56. Литвинов А.С., Рошупко В.Ф. Изменение термического режима Волги в условиях зарегулирования стока // Водные ресурсы. 1992. № 6 С. 44-50.

57. Литвинов А.С., Рошупко В.Ф. Термическая характеристика водохранилищ Волжского каскада // Формирование и динамика полей гидрологических и гидрохимических характеристик во внутренних водоемах и их моделирование. С.-Петербург: Гидрометеиздат, 1993. С. 3–24.
58. Автоматизированный комплекс для исследования структуры и динамики водных масс и водохранилищ / А.С. Литвинов, С.А. Поддубный, С.В. Широков, Б.В. Корешков, Е.Н. Соколова // Водные ресурсы. 1994. Т. 21, № 6. С. 631–640.
59. Литвинов А.С. Изменение характеристик энерго- и массообмена Волги при создании каскада водохранилищ // Тр. Международной конф. "Перспективы развития естественных наук на Западном Урале". Пермь, 1996. С. 64–66.
60. Литвинов А.С., Ривьер И.К. Влияние гидрологических процессов на распределение зоопланктона в Рыбинском водохранилище // Водные ресурсы. 1991. № 6. С. 73–81.
61. Лифшиц В.Х., Бархатова И.В., Литвинов А.С. Пространственно-временная изменчивость температуры воды в Рыбинском водохранилище по данным автономных дистанционных измерений // Информ. бюлл. Биология внутренних вод. 1984. № 63. С. 64–67.
62. Материалы наблюдений на водохранилищах (Дополнение к гидрологическому ежегоднику). М., 1955-1960, 1961-1962, 1963, 1964, 1967, 1968. Т. 4. Вып. 1-3. .
63. Материалы наблюдений на озерах и водохранилищах (Дополнение к гидрологическому ежегоднику). Горький, 1965-1976, 1969-1977. Т. 4. Вып. 1-3. .
64. Ривьер И.К., Литвинов А.С. Экологический подход к районированию водохранилищ Верхней Волги в зонах поступления сточных вод // Водные ресурсы. 1996. Т. 23, № 1. С. 91–104.
65. Ривьер И.К., Литвинов А.С. Исследования районов повышенной экологической опасности на водохранилищах Верхней Волги // Водные ресурсы. 1997. Т.24, №5. С.590–602.
66. Рошупко В.Ф., Литвинов А.С. Термический режим Шекснинского водохранилища // Экологические исследования водоемов Волго-Балтийской и Северо-Двинской водных систем. Л., 1982. С. 26–44.

67. Циркуляция вод в Сасыкском водохранилище / В.М. Тимченко, А.С. Литвинов, М.П. Колесник, С.А. Поддубный // Гидробиологический журнал. Киев, 1988. Т. 24, № 4. С. 67–73.
68. Фомичев И.Ф., Литвинов А.С. Многолетние изменения составляющих водного баланса Рыбинского водохранилища и их влияние на водообмен и уровень // Водные ресурсы. 1980. № 4. С. 108–119.
69. Фомичев И.Ф., Литвинов А.С. О внутреннем водообмене в Рыбинском водохранилище // Экологические исследования водоемов Волго-Балтийской и Северо-Двинской водных систем. Л., 1982. С. 168–174.
70. Шнитников А.В. Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера // Л., Наука. 1966. С. 5.
71. Штефан В.Н. К расчету водообмена долинных водохранилищ // Вест. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1975. № 5. С. 71–75.
72. Эдельштейн К.К. Водные массы долинных водохранилищ. М.: Изд-во МГУ, 1991. 175 с.
73. Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277с.
74. Экологические факторы пространственного распределения и перемещения гидробионтов. С.–Петербург: Гидрометеоиздат, 1993. 252 с
75. Butorin N.V., Litvinov A.S. Structure Peculiarities and Variability of the temperature Range in reservoirs // Arch. Hydrobiol. Beth. 33. Stuttgart. 1989. S. 27–33.
76. Kozezski H.P., Litvinov A.S., Mohaupt V., Pagenkopf W. G. Der Wasseranstansch zwischen Spree und Kleinem Muggelsee // Acta Hydrophysica. Bd. XXVIII. H 4. Berlin. 1983. S. 47–54.
77. Litvinov A.S., Mineeva N.M. Characteristics of the Summer Hydrological Regimen and Chlorophyll distribution in the Volga River Reservoirs Int // Revus ges Hydrobiol. 1994. P. 229–234.
78. Litvinov A.S. Hydrological processes and distribution of hydrobionts in the Rybinsk Reservoir // Arch. Hidrobiol. Beih. 40, Stuttgart, 1994. P. 45–49.
79. Litvinov A.S., Roshchupko V.F. Changes of the Volga River thermal regimen after constructing the Volga River reservoir cascade // Arch. Hidrobiol. Beih. 40 Stuttgart. 1994. P. 41–44.

80. Litvinov A.S. Ecological consequences of the Rybinsk reservoir level decrease // *Reservoir Management and Water Supply-an Integrated System*. Volume 2. Prague, Czech Republic. 1997. P. 267-273.
81. Litvinov A.S. Long -Term Fluctuations in River Discharge of the Upper Volga and its influence on Ecosystem status // 3-rd International Conference on Reservoir Limnology and Water Quality. České Budejovice, Czech Republic. 1997. P. 253-258.
82. Litvinov A.S., Mineeva N.M. Phytoplankton Development and Hydrological Conditions in Two Large Reservoirs (Volga River System) // *Int. Review ges Hydrobiol.* 83. 1998 Special Issue. P. 179-182.
83. Mineeva N.M., Litvinov A.S. Long -Term variation of chlorophyll content in Rybinsk reservoir (Russian) in relation to its hydrological regime // *Management of lake and Reservoirs during*. NATO ASI series 2. Environment. Vol. 4.2, 1998. P. 159-183.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ	3
Материалы и методика	3
Глава 1. ВОДНЫЙ БАЛАНС И ВОДООБМЕН ВОДОХРАНИЛИЩ ВОЛЖСКОГО КАСКАДА	6
1.1 Многолетние изменения составляющих водного баланса	7
1.2. Внутригодовая изменчивость составляющих баланса	11
1.3. Многолетняя и сезонная изменчивость водообмена водохранилищ Волжского каскада	13
Глава 2. СТРУКТУРА ТЕЧЕНИЙ И ЦИРКУЛЯЦИИ ВОД В ВОДОХРАНИЛИЩАХ	17
2.1. Пространственно–временная изменчивость течений в водохранилищах	18
2.1.1. Течения в нижних и верхних бьефах ГЭС	18
2.1.2. Течения в озеровидных плесах	25
2.2. Характеристика макротурбулентного обмена	28
2.3. Моделирование течений в водохранилищах	30
2.4. Оценка внутреннего водообмена	36
Глава 3. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И СТРУКТУРА ПОЛЕЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК	38
3.1. Закономерности формирования поля температуры в водохранилищах	39
3.2. Временная изменчивость гидрофизических характеристик	41
3.3. Пространственные изменения гидрофизических характеристик	45
3.4. Особенности энерго– и массообмена в районе сброса подогретых вод тепловых электростанций ..	49
3.5. Теплозапас и тепловой сток водохранилищ Волги	52

Глава 4. ЭКОЛОГО-ГИДРОЛОГИЧЕСКОЕ РАЙОНИРОВАНИЕ ВОДОХРАНИЛИЩ.....	55
4.1. Районирование водохранилищ с использованием статистических методов.....	55
4.2. Экологический подход к районированию водохранилищ.....	58
Глава 5. ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭКОСИСТЕМ ВОЛЖСКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ	61
5.1. Анализ особенностей функционирования экосистемы Рыбинского водохранилища.....	62
5.2. Гидрологические процессы и распределение гидробионтов в водохранилищах	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	72
ЛИТЕРАТУРА	74

Научное издание

Литвинов Александр Сергеевич

**ЭНЕРГО- И МАССООБМЕН В ВОДОХРАНИЛИЩАХ
ВОЛЖСКОГО КАСКАДА**

Редактирование и компьютерная верстка
Л.С. Кокиной, М.А. Канакотиной

Изд. лиц. ЛР N020311 от 15.12.96. Подписано в печать 22.02.2000.
Формат 60х84 1/16. Бумага белая. Гарнитура Таймс. Печать офсетная
Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. 4,82. Тираж 150. Заказ 3514

Ярославский государственный технический университет
150023, Ярославль, Московский пр., 88

Типография Ярославского государственного технического университета
150028, Ярославль, ул. Советская, 14а