

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

Географический факультет



На правах рукописи

ЕРИНА Оксана Николаевна

**РЕЖИМ РАСТВОРЕННОГО КИСЛОРОДА
В СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ МОСКВОРЕЦКОЙ
СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ Г. МОСКВЫ**

25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата географических наук**

Научный руководитель:

кандидат географических наук, доцент

ДАЦЕНКО Юрий Сергеевич

Москва – 2015

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. РАСТВОРЕННЫЙ КИСЛОРОД В ПРЕСНЫХ ВОДОЕМАХ	12
1.1. Факторы, определяющие формирование кислородного режима.....	12
1.1.1. Обмен с атмосферой	12
1.1.2. Фотосинтез.....	15
1.1.3. Биохимическое потребление кислорода в воде	18
1.1.4. Обмен кислорода с донными отложениями	22
1.1.5. Плотностные течения	26
1.2. Методы определения растворенного кислорода	27
1.2.1. Метод Винклера	27
1.2.2. Электрохимические методы.....	28
1.2.3. Оптический метод.....	30
1.3. Типы распределения растворенного кислорода в водоемах	31
Выводы.....	33
ГЛАВА 2. КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ ВОДОХРАНИЛИЩ МОСКВОРЕЦКОЙ ВОДНОЙ СИСТЕМЫ.....	34
2.1. Объекты исследования	34
2.2. Материалы и методы полевых исследований.....	41
2.3. Режим растворенного кислорода в изучаемых водохранилищах....	43
2.5. Влияние гидрофизических условий на кислородный режим.....	59
2.6. Развитие бескислородных условий в водохранилищах.....	63
Выводы.....	69
ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА В ДОЛИННЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ	71
3.1. Обзор существующих моделей содержания растворенного кислорода в водоемах суши	71
3.1.1. Основные расчетные схемы.....	71
3.1.2. Существующие гидроэкологические модели, включающие блок расчета содержания растворенного кислорода	74
3.2. Гидрологическая модель водохранилища ГМВ-МГУ	80

3.2.1. Общие сведения.....	80
3.2.2. Блок расчета содержания растворенного кислорода.....	86
3.3. Подготовка исходной информации для расчетов и верификации...	93
3.4. Оценка качества модельного расчета содержания растворенного кислорода	100
3.4.1. Критерии оценки качества результатов моделирования	100
3.4.2. Верификация и калибровка кислородного блока модели ГМВ-МГУ	101
3.4.3. Валидация кислородного блока модели ГМВ-МГУ	109
Выводы.....	115
ГЛАВА 4. МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА КИСЛОРОДНЫЙ БАЛАНС И РЕЖИМ МОСКВОРЕЦКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ	116
4.1. Оценка составляющих кислородного баланса в водохранилищах	116
4.1.1. Обоснование модельных расчетов кислородного баланса	116
4.1.2. Кислородный баланс в летний период.....	118
4.1.3. Кислородный баланс в период ледостава.....	128
4.2. Исследование формирования и развития гипоксидной зоны	134
4.2.1. Обоснование исследования.....	134
4.2.2. Развитие бескислородных условий в различные по водности годы.....	135
4.2.3. Влияние погодных условий в летний период на развитие гипоксидной зоны	139
4.3. Влияние уровня режима водохранилищ Москворецкой водохозяйственной системы в летний период на кислородные условия.....	143
Выводы.....	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	150
ЛИТЕРАТУРА	153
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	167
Приложение А. Расчетные характеристики кислородного режима водохранилищ Москворецкой водохозяйственной системы по данным гидролого-гидрохимических съемок.....	167

Приложение Б. Параметры блока химико-биологических взаимодействий модели ГМВ	170
Приложение В. Оценка погрешности смоделированных значений содержания растворенного кислорода в водохранилищах Москворецкой водной системы по результатам серии валидационных расчетов (S – среднеквадратическая ошибка расчета (мг/л), T – индекс Тейла)	175
Приложение Г. Результаты расчетов кислородного баланса водохранилищ Москворецкой водохозяйственной системы в летний период по результатам моделирования.....	177
Приложение Д. Оценка вклада внутриводоемных течений в кислородный баланс Москворецких водохранилищ в летний период по данным моделирования.....	180
Приложение Е. Результаты сценарных модельных расчетов влияния уровня режима водохранилищ в летний период на кислородные условия в них	185

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Содержание растворенного кислорода является одной из важнейших характеристик качества воды в водохранилищах, поскольку служит интегральным показателем продукционно-деструкционных и динамических процессов, протекающих в водных экосистемах. Особое значение эта характеристика приобретает при изучении стратифицированных водоемов в летний период ввиду того, что возникающая в них плотностная стратификация препятствует обмену растворенным кислородом между фотическим слоем, где происходит его продуцирование в результате процесса фотосинтеза, и гипolimнионом. В нём кислород расходуется при биохимическом окислении органических веществ и к концу летнего периода может исчезать полностью. В результате формирования бескислородных условий в гипolimнионе происходит резкое ухудшение качества воды, развитие болезнетворных бактерий и заморные явления, возникновение привкусов и запахов, трудно устранимых в питьевой воде.

Задача расчета пространственно-временных изменений содержания растворенного кислорода чрезвычайно актуальна для водохранилищ – источников водоснабжения г. Москвы, в особенности для базовых водоемов Москворецкой водохозяйственной системы: Рузского, Можайского, Озернинского и Истринского. По трофическому состоянию эти водохранилища относятся к мезотрофно-эвтрофным водоемам со значительными внутригодовыми колебаниями концентрации кислорода, в которых явление аноксии обычно.

В диссертационной работе кислородный режим водохранилищ анализируется на основании обобщения данных полевых наблюдений и результатов расчета концентраций растворенного кислорода в кислородном блоке гидрологической модели водохранилищ (ГМВ-МГУ). Математическое моделирование служит удобным инструментом для изучения водных экосистем, поскольку позволяет проследить за изменениями их состояния без проведения регулярных гидролого-гидрохимических съемок водохранилищ и

определения большого количества компонентов химического состава воды. С использованием модели в качестве инструмента также возможно проведение диагностических расчетов с целью поиска такого соотношения регулируемых параметров режима водохранилищ, при котором может быть достигнуто оптимальное для водопользования качество воды, поступающей в нижний бьеф гидроузла.

Степень разработанности темы. Исследования кислородного режима водных объектов проводятся с конца XIX в. [Winkler, 1888]. В начале XX в. активно изучаются механизмы процессов обмена кислородом между водой и атмосферой [Adeney, Becker, 1919], получены первые количественные оценки потребления кислорода при деструкции органического вещества в водной толще [Кузнецов, Карзинкин, 1931] и потребление O_2 донными отложениями [Хатчинсон, 1969], изучается влияние возникающих в озерах плотностных течений на распределение кислорода [Rossolimo, 1935]. В это же время появляется первая модель динамики растворенного кислорода в водотоке [Streeter, Phelps, 1925], не потерявшая своей значимости и в настоящее время.

Во второй половине XX в. благодаря появлению полярографических датчиков стал возможен сбор массового материала о пространственно-временных полях растворенного кислорода. Активно изучается кислородный режим уже существующих и создающихся водохранилищ [Водохранилища Верхней..., 1975; Водохранилища Москворецкой..., 1985; Ивановское..., 1978]. Продолжается изучение определяющих его факторов [Бреховских, 1988; Кременецкая, 2001].

В конце 70-х гг. начинают появляться первые гидроэкологические модели, в которых присутствует переменная «растворенный кислород»; эти модели носят концептуальный характер. Большой вклад в разработку экосистемных моделей внесли В.В. Меншуткин, А.В. Леонов.

Однако, несмотря на накопленный более чем за век изучения кислородного режима озер и водохранилищ материал, в литературе редко встречаются обобщающие работы с интегральными характеристиками

кислородного режима и многолетними тенденциями его изменений. Остается недостаточно исследованным и вопрос количественной оценки влияющих факторов с позиции улучшения кислородных условий водохранилищ при помощи управления сбросами воды через гидроузлы.

Цели и задачи исследования. Цель работы – анализ и количественная оценка комплекса факторов, определяющих формирование кислородного режима водохранилищ Москворецкой водной системы, на основе полевых наблюдений и математического моделирования.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

- выполнить сбор и обобщение данных наблюдений за кислородным режимом водохранилищ Москворецкой водной системы;
- изучить особенности кислородного режима водохранилищ и выявить закономерности его изменений при смене гидрометеорологических условий;
- провести расчеты интегральных показателей кислородного режима по данным наблюдений;
- выполнить обзор существующих гидроэкологических моделей водоемов, по которым производят расчет содержания растворенного кислорода, сопоставить их по учитываемым процессам и выбрать подходящую модель в качестве инструмента исследования;
- при необходимости усовершенствовать алгоритм используемой модели;
- подготовить всю необходимую информацию для проведения модельных расчетов кислородного режима, провести подробную верификацию и калибровку модели, а также её валидацию;
- на основании диагностических модельных расчетов изучить структуру кислородного баланса в разных районах водохранилищ в зимний и летний сезоны;
- оценить влияние гидрометеорологических условий и режима работы гидроузлов на кислородный баланс водохранилищ;

- модельными расчетами воспроизвести формирование и развитие гипоксидных условий в изучаемых водохранилищах в зимний и особенно в летний периоды;

- серией численных экспериментов провести оценку влияния водности притока и уровня режима водохранилища летом на объем зоны глубинной острой гипоксии.

Объект и предмет исследования.

Объектами исследования выбраны четыре базовых водохранилища Москворецкого источника водоснабжения г. Москвы – Можайское, расположенное в верховьях водосбора р. Москвы, Рузское – на левом притоке р. Москвы р. Рузе, Озернинское – на самом крупном притоке р. Рузы р. Озерне и Истринское – на р. Истре, левом притоке р. Москвы.

Предмет исследования – внутригодовая изменчивость кислородного режима морфологически разнотипных водохранилищ, характеризующая особенности формирования в каждом из них наилучших питьевых качеств воды для её использования на муниципальных водопроводных станциях страны.

Материалы и методы исследования. В работе использованы архивные материалы 40-летних исследований Красновидовской лаборатории по изучению водохранилищ (ныне Красновидовская учебно-научная база), Географического факультета МГУ, а также материалы совместных полевых исследований Можайского водохранилища с группой внутриводоемных процессов ИВП РАН. Помимо этого использованы данные наблюдений на рейдовой вертикали Можайского водохранилища и более 20 его гидролого-гидрохимических съемок, полученные автором в 2011–2014 гг. По инициативе автора и с его участием в 2013 году организованы и проведены 2 серии таких съемок всех четырех исследуемых водных объектов.

Методологическую основу выполненных работ наряду с режимными, балансовыми и экспериментальными полевыми наблюдениями составили:

- метод гидролого-гидрохимических квазисинхронных съемок водохранилищ;

- унифицированные химико-аналитические методы лабораторного исследования химического состава проб воды;

- метод математического моделирования ансамбля гидроэкологических процессов внутриводоемной трансформации состава речных вод;

- методы географической аналогии, математической статистики и др.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

- впервые проведено обобщение специфики формирования кислородного режима и аноксии в стратифицированных водохранилищах Москворецкой водохозяйственной системы в годы различной водности с меняющимися погодными условиями за почти полувековой период их существования;

- автором впервые проведена адаптация, верификация и валидация кислородного блока модели ГМВ-МГУ для морфологически простых и многолопастных водохранилищ многолетнего регулирования стока, но различной проточности;

- впервые модельными расчетами оценен вклад разнообразных процессов в баланс растворенного кислорода морфометрически различных районов водохранилищ, включая транзит водными массами при изменяющемся режиме регулирования гидроузлом речного стока;

- впервые установлены закономерности изменения кислородного индекса и объемов гипоксидной и аноксидной зон в Можайском, Рузском, Озернинском и Истринском водохранилищах в зависимости от колебаний в них уровня воды и водности года.

Предмет защиты – моделирование внутрисезонной изменчивости содержания кислорода в воде водохранилищ для оценки и прогноза их экологического состояния.

Основные защищаемые положения:

1. Статистически значимая связь интегральных показателей кислородного режима долинных водохранилищ с параметрами гидродинамической устойчивости их стратифицированной водной толщи.

2. Особенности формирования и развития гипоксидной зоны определяются гидрометеорологическими условиями в вегетационный период и регулированием водного режима водохранилищ.

3. Закономерности пространственных изменений структуры кислородного баланса долинных водохранилищ, обусловленные продольной асимметрией их ложа и комплексом внутриводоемных процессов в зимний и летний периоды, вклад различных течений в обмен кислородом между районами водохранилищ.

4. Повышение уровня воды в водохранилищах в летний период приводит к увеличению объема гипоксидной зоны. Продукционные процессы интенсифицируют её рост, но не влияют на максимальный объем зоны, который определяется положением слоя температурного скачка и толщиной гипоплимниона.

Практическая значимость работы.

Результаты работы используются при мониторинге качества воды Москворецких водохранилищ, а также при прогнозировании объема гипоксидной зоны в зависимости от водности года и диспетчерского графика регулирования сбросов воды гидроузлом. Расчет сроков появления и объема аноксидной и гипоксидной зон имеет важное значение для рыбохозяйственных организаций, осуществляющих зарыбление пригородных водоемов для любительского рыболовства.

Результаты работы использованы при выполнении проекта РФФИ «Моделирование режима растворенного кислорода в стратифицированных водохранилищах» (№ 12-05-00176_a), а также проекта №12-фцп-Н5-07 «Изучение влияния экстремально жарких периодов на гидрохимические и гидробиологические характеристики систем водоснабжения на примере г. Москвы» в рамках выполнения федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах».

Апробация результатов исследования. Результаты исследований, проведенных в рамках работы над диссертацией, докладывались, обсуждались и опубликованы в трудах следующих конгрессов, конференций и семинаров:

III, IV и V Международные научно-практические конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов» (Пермь, 2011, 2013, 2015); V Всероссийский симпозиум с международным участием «Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах» (Петрозаводск, 2012); Всероссийская конференция «Бассейн Волги в XXI-м веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ» (Борок, 2012); Всероссийская научная конференция «Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз» (Туапсе, 2013); Международная научная конференция «Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата» (Минск, 2015); Всероссийская научная конференция с международным участием «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод» (Ростов-на-Дону, 2015).

По теме диссертации имеется 15 публикаций, в том числе три статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и 6 приложений. Общий объем диссертации 188 страниц, основной текст изложен на 148 страницах и содержит 13 таблиц и 37 рисунков. Список литературы включает 156 наименований, в том числе 74 на иностранных языках.

Автор выражает благодарность заведующему Красновидовской УНБ к.г.н., с.н.с. В.В. Пуклакову и н.с. Красновидовской УНБ, к.г.н. Д.И. Соколову за содействие в организации и проведении полевых работ, сотрудникам ИВП РАН к.г.н., с.н.с. Е.Р. Кременецкой и к.г.н., н.с. Д.В. Ломовой за предоставленные данные, д.г.н., проф. кафедры гидрологии суши К.К. Эдельштейну и к.г.н., с.н.с. Ефимовой Л.Е. за консультации, технику Красновидовской УНБ В.В. Кочневой за помощь в проведении лабораторного анализа проб воды, а также с.н.с. Красновидовской УНБ, к.б.н. С.Л. Беловой и в.н.с. кафедры гидрологии суши, к.б.н. А.В. Гончарову за любезно предоставленную информацию о биомассе, численности и видовом составе фитопланктона Москворецких водохранилищ.

ГЛАВА 1. РАСТВОРЕННЫЙ КИСЛОРОД В ПРЕСНЫХ ВОДОЕМАХ

1.1. Факторы, определяющие формирование кислородного режима

1.1.1. Обмен с атмосферой

Обмен кислородом воды с атмосферой вызван наличием при конкретных значениях температуры и атмосферного давления такой концентрации C_s , при которой достигается равновесие между атмосферным кислородом и растворенным в воде. Растворимость кислорода и его парциальное давление в воздухе линейно связаны.

Концентрация насыщения O_2 определяется по таблице растворимости кислорода в воде при данных значениях температуры воды и атмосферного давления. Существует множество таблиц растворимости, среди которых наиболее известны таблица Трусдейла [Хатчинсон, 1969] и Элмора-Хейса [Эдельштейн, 1972], однако единой стандартной таблицы растворимости кислорода в воде не существует [Бреховских, 1988].

Уравнение (1.1), описывающее процесс насыщения воды кислородом в виде реакции первого порядка, является наиболее широко используемой формализацией данного процесса:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = k_2(C_s - C) \quad (1.1)$$

где C – наблюдаемая концентрация, C_s – концентрация насыщения, k_2 – коэффициент аэрации.

В теоретическом аспекте и лабораторных экспериментах поступление атмосферного кислорода в водный объект через поверхность раздела «воздух-вода» рассматривается в трех возможных случаях: 1) вода находится в спокойном состоянии (исключая её молекулярное движение); 2) вода находится

в состоянии полного перемешивания, градиентов содержания кислорода в ней не возникает; 3) поступление кислорода в водоем происходит так же, как в столбе воды, имеющем поверхность соприкосновения с атмосферой и находящемся в неподвижном состоянии [Хатчинсон, 1969].

В первом случае, если допустить, что водные массы озера пребывают в полном покое и в них происходит только молекулярное движение, то в равновесии с атмосферой находится лишь тонкий поверхностный слой. Роль молекулярной диффузии в распространении газов из этого слоя в остальную массу воды была исследована Гроте [Grote, 1934]. Скорость переноса O_2 молекулярной диффузией через некоторую плоскость может быть выражена уравнением диффузии (1.2), предложенным Фиком:

$$\frac{\partial o}{\partial t} = -ak \frac{\partial |O_2|_z}{\partial z} \quad (1.2)$$

где a – площадь рассматриваемого участка плоскости, обычно принимаемая равной 1, $\frac{\partial |O_2|_z}{\partial z}$ – вертикальный градиент содержания O_2 , k – коэффициент молекулярной диффузии (для O_2 $k = 1,98 \cdot 10^{-5}$ см/с).

Изменение концентрации кислорода на определенной глубине во времени описывается уравнением (1.3):

$$\frac{\partial |O_2|_z}{\partial t} = k \frac{\partial^2 |O_2|_z}{\partial z^2} \quad (1.3)$$

Используя это уравнение, стало возможным рассчитать изменения концентрации O_2 на различных глубинах за определенные промежутки времени после изменения поверхностной концентрации на величину ΔC . Результаты такого исследования показали, что изменения, связанные с диффузией, не оказывают видимого влияния на насыщение водоема растворенным кислородом (РК).

Во втором случае, при отсутствии вертикальных градиентов растворенного кислорода, когда водоем находится в состоянии полного перемешивания, скорость обмена кислородом между атмосферой и водной поверхностью выражается законом Бора (1.4):

$$\frac{\partial O}{\partial t} = a(\alpha - \beta |O_2|_t) \quad (1.4)$$

где a – единица площади поверхности раздела; α – коэффициент поступления, характеризующий поступление кислорода из воздуха, β – коэффициент удаления, показывающий удаление кислорода в атмосферу.

Изучение скорости растворения O_2 из воздушного пузыря, поднимающегося через воду в закрытом цилиндре [Adeney, Becker, 1919], показало, что коэффициент удаления кислорода увеличивается с ростом температуры, значения концентрации насыщения уменьшаются, а коэффициент поступления остается практически неизменным. При этом лабораторными экспериментами получено [Ляхин, 1978], что коэффициент поступления кислорода α примерно в два раза больше коэффициента удаления β .

Параметры газообмена между водой и атмосферой определяются совокупностью процессов, протекающих в водоеме: как гидрофизических, так и химико-биологических. Так, состояние водной поверхности может в значительной степени определять скорость обменных процессов [Мизандронцев, Мизандронцева, 1995]. В условиях антициклонического типа погоды в поверхностном микрослое скапливаются вещества, выделяемые водными организмами в процессе их жизнедеятельности, которые формируют пленку, препятствующую оттоку кислорода в атмосферу. В ветреную погоду, напротив, происходит увеличение площади газообмена на поверхности раздела сред вследствие образования волн.

В стратифицированных водоемах кислород, поступающий в процессе инвазии, проникает в нижележащие слои благодаря турбулентному обмену, главным образом – вертикальной турбулентной диффузии.

Кроме того, газообмен между водоемами и атмосферой может происходить в результате переноса воздушных пузырьков. Однако проведенные в этой области исследования показали, что лишь при скорости ветра более 16,5 м/с газообмен через поверхность с воздушными пузырьками повышает молекулярный газообмен через поверхность водоемов, а при скорости ветра меньше 10–12 м/с влиянием воздушных пузырьков можно и вовсе пренебречь [Савенко, 1990].

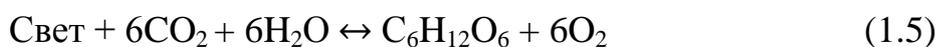
1.1.2. Фотосинтез

Фотосинтез водорослей и погруженных макрофитов – важный элемент кислородного баланса в водоемах, особенно высокоэвтрофных. Установлено, что в эвтрофные водоемы вследствие фотосинтетической аэрации может поступать в несколько раз больше O_2 , чем в олиготрофные. Например, в небольшом эвтрофном водоеме с зарослями погруженных макрофитов доля фотосинтеза в общем количестве поступающего O_2 может достигать 98% [Ondok, Pokorny, 1982].

Фотосинтез оказывает колоссальное влияние на изменение концентрации растворенного кислорода в фотическом слое в вегетационный сезон. Существенное превышение концентрации насыщения O_2 может быть вызвано только интенсивным фотосинтезом. Интенсивное «цветение» водоемов сине-зелеными водорослями приводит к пересыщению поверхностных горизонтов до 200–280% насыщения [Рекомендации..., 1980; Цыцарин, 1988]. В такие периоды интенсивность поступления кислорода в воду при фотосинтезе существенно превышает скорость его эвазии в атмосферу. При штилевой погоде наблюдается горизонтальная пятнистость и неравномерность в вертикальном распределении содержания растворенного кислорода внутри

фотической зоны, а при возникновении ветрового волнения содержание растворенного кислорода выравнивается внутри зоны, где протекает фотосинтез. Вследствие отсутствия процесса фотосинтеза в ночное время происходят и внутрисуточные колебания кислорода в поверхностных слоях ввиду того, что потребление O_2 на дыхание и деструкцию происходят непрерывно, а поступление кислорода – только в светлое время суток.

Процесс первичного продуцирования гидробионтами-автотрофами может быть записан в виде следующего уравнения (1.5):



При протекании реакции слева направо происходит фотосинтез: поглощается диоксид углерода, в воду выделяется кислород и продуцируется органическое вещество (ОВ). В темноте реакция протекает справа налево и характеризует процесс дыхания, при котором поглощается кислород и выделяется углекислый газ.

Поглощение света водными растениями происходит благодаря наличию в клетке фотосинтезирующих пигментов – хлорофиллов, которые играют важнейшую роль в структуре фотосинтетической системы. До некоторого предела интенсивность фотосинтеза возрастает при усилении освещенности, однако после наступления «светового насыщения» дальнейшее увеличение освещенности приводит к замедлению процессов первичного продуцирования. Однако этот предел не является постоянным: он увеличивается с ростом температуры. Помимо этого, водоросли многочисленными способами адаптируются к условиям избыточной и недостаточной освещенности. Так, например, у клеток фитопланктона, обитающих в условиях низкой освещенности, концентрация фотосинтетических пигментов, главным образом зеленого пигмента хлорофилла «а», выше, чем у адаптированных к высокой освещенности организмов [Йоргенсен, 1985]. Это приводит к тому, что при

увеличении освещенности интенсивность фотосинтеза практически не отличается вследствие подобных адаптаций.

Наряду с освещенностью существует еще два важнейших фактора, регулирующих интенсивность фотосинтеза – это температура воды и наличие в воде биогенных элементов.

Температурные оптимумы у фитопланктона очень различны, что способствует возникновению сезонной сукцессии в течение вегетационного периода [Одум, 1975]. Сразу после схода льда в водоемах развиваются холоднолюбивые виды диатомовых водорослей, клетки которых начинают отмирать при достижении верхнего температурного предела их выживаемости. На смену им приходят более теплолюбивые группы водорослей – зеленые и синезеленые.

К числу основных биогенных элементов относятся углерод, азот, фосфор и (для диатомовых водорослей) кремний. Это структурные элементы, из которых состоят клетки фитопланктона и без которых невозможна их жизнедеятельность. Поэтому при формализации процессов фотосинтеза чаще всего пользуются принципом минимума Либиха, согласно которому величина прироста любого организма определяется количеством того вещества, которое присутствует в окружающей среде в наименьшем по отношению к потребностям организма количестве [Хатчинсон, 1969].

Немаловажным фактором, оказывающим влияние на интенсивность первичного продуцирования, является скорость течения в водоеме. Существуют исследования, показывающие, насколько чувствительны клетки фитопланктона озер и водохранилищ по отношению к движению воды [Оксиюк, 1971]. Результаты натуральных и лабораторных экспериментов показывают, что увеличение скорости течения приводит к снижению численности синезеленых водорослей, однако у других групп фитопланктона может приводить и к увеличению интенсивности фотосинтеза [Быковский, 1978].

В водоемах замедленного водообмена более корректным будет рассмотрение не скорости течения, а толщины перемешиваемого слоя при ветровом воздействии слоя, что подтверждают результаты исследований [Новиков, 1978; Приймаченко, Литвинова, 1968; Harris, Haffner, Piccinin, 1980]. Толщина перемешиваемого слоя является важнейшей характеристикой при рассмотрении факторов, определяющих интенсивность фотосинтеза.

В стратифицированных водоемах увеличение перемешанного слоя вследствие нарушения стратификации приводит к притоку биогенных элементов в фотическую зону из нижележащих горизонтов, что, в свою очередь, приводит к всплеску «цветения» фитопланктона [Reynolds, 1981].

Интенсивность фотосинтеза определяется и размерами клеток фитопланктона. С увеличением удельной поверхности водорослей и уменьшением их объема скорость фотосинтеза возрастает [Щербак, 1998] вследствие более высокого содержания фотосинтетических пигментов в мелких клетках [Пырина, Елизарова, 1971]. Также это может быть связано с более высокой долей органического углерода в менее объемных клетках, которая прямо пропорциональна интенсивности фотосинтеза [Гуттельмахер, 1986; Strathman, 1967]. Именно этим объясняется снижение со временем продуктивности популяции по сравнению с начальным этапом её развития в водоеме.

1.1.3. Биохимическое потребление кислорода в воде

В озерах с интенсивными биохимическими процессами часто возникают значительные отклонения от концентрации насыщения. Так, например, в водоемах Северной Америки содержание РК изменяется в диапазоне от 38 до 150% насыщения. При этом средняя величина насыщения составляет около 93%. В 36% водоемов Северной Америки содержание РК превышает нормальное значение. В 45% озер Японии тоже может наблюдаться пресыщение воды кислородом [Хатчинсон, 1969].

Любое заметное пересыщение воды растворенным кислородом связано с интенсивным фотосинтезом, причины же его недостатка могут быть различными. Так, например, в озерах, содержащих большое количество взвешенных частиц серы вулканического происхождения, содержание O_2 невелико (30–35% насыщение). По-видимому, окисление серы или растворенных в воде соединений серы и железа и приводит к низкому содержанию O_2 в подобных озерах.

Однако основные потребители кислорода – это водные гидробионты: фитопланктон, зоопланктон и бактериопланктон. Помимо затрат на дыхание кислород также расходуется на окисление автохтонных и аллохтонных органических веществ.

По имеющимся в литературе данным [Иванова, 1985] на долю зоопланктона приходится от 5 до 34% от суммарного потребления кислорода в водной толще. Эта величина неодинакова в течение года и может меняться в зависимости от численности и видового состава зоопланктона до 20 раз [Романова, 1993]. В центральной части ЕТР максимум биомассы зоопланктона приходится на конец мая – начало июня. В это время в водохранилище развиваются диатомовые водоросли и мелкие водные бактерии, являющиеся пищей для зоопланктона. Фильтрационный аппарат планктоноядного зоопланктона непригоден для питания крупными клетками водорослей, например пиррофитовыми, или колониями синезеленых [Эдельштейн, 1998]. Поэтому развитие данных групп фитопланктона не способствует увеличению биомассы зоопланктона, в литературе имеются данные об обратной связи между первичной продукцией фитопланктона и биомассой планктоноядного зоопланктона [Бердавцева, Лебедев, Мальцман, 1971].

Скорость потребления кислорода зоопланктоном и рыбами при дыхании определяется температурными условиями, а также размером организма. Температурных зависимостей существует довольно много и они различаются для крупных и мелких организмов. Уравнение, связывающее скорость дыхания (R) с размерами тела, выглядит следующим образом (1.6) [Винберг, 1971]:

$$R = AW^k \quad (1.6)$$

где A и k – эмпирические коэффициенты, зависящие от температуры ($k < 1$), W – размер тела животного. Значения коэффициента A зависят, помимо температуры, от активности гидробионтов: у активных они выше, чем у пассивных. Однако ввиду незначительности пассивной компоненты метаболизма у водных животных, при расчете скорости дыхания ею чаще всего пренебрегают [Страшкраба, Гнаука, 1989].

Ввиду высокой численности фитопланктона и высокой интенсивности его дыхания, несмотря на небольшой размер клеток, его общий вклад в суммарное потребление кислорода максимален [Алимов, 1989]. В эвтрофных водоемах случаются ситуации, когда в результате длительного интенсивного развития фитопланктона интенсивность дыхания клеток превышает скорость фотосинтеза, что приводит к катастрофическим последствиям. В литературе [Хатчинсон, 1969] описываются случаи, когда в течение светового дня концентрация РК в поверхностном горизонте изменялась от 250 до 27% насыщения. При антициклональной штилевой погоде подобные явления могут приводить к массовым заморам рыбы и резко ухудшать качество воды в водоемах.

При формализации процесса дыхания его интенсивность часто принимается прямо пропорциональной температуре воды. При этом в реальности увеличение интенсивности фотосинтеза также приводит к увеличению интенсивности дыхания. Поэтому принято разделять дыхание на пассивное (темновое), определяемое температурой воды и протекающее без участия света, и активное (фотодыхание), которым обладают многие водные растения. Данный тип дыхания возникает лишь при высокой освещенности, его интенсивность может в десятки раз превышать интенсивность темнового дыхания и она линейно возрастает вслед за увеличением содержания растворенного кислорода в воде [Страшкраба, Гнаука, 1989].

Бактерии также могут вносить значительный вклад в суммарное потребление кислорода в водной толще. Исследования на озере Глубоком [Кузнецов, Карзинкин, 1931] показали, что металимниальный минимум кислорода вызван скоплением бактерий в данном слое. Расчеты авторов показали, что потребление ими РК может достигать 0,24 мг/л O₂ в сутки.

Скорость потребления кислорода бактериопланктоном во многом определяется характером органических веществ, присутствующих в воде. Однако линейная зависимость между потреблением кислорода бактериями и скоростью минерализации ОВ сохраняется лишь при низких концентрациях. При обогащении водной толщи легкоокисляемыми органическими веществами вследствие снижения концентрации кислорода пропорциональность нарушается [Ризниченко, Рубин, 1993].

По данным Цобелла и Стадлера [Zobell, Stadler, 1940] в естественных популяциях бактерий оз. Мендота скорость поглощения O₂ первоначально составляет 0,28 мг/л сутки при 25 °С. Однако по мере исчерпания усвояемого бактериями ОВ она быстро уменьшается. Эксперименты показали, что в диапазоне концентрации РК от 0,3 до 36 мг/л поглощение кислорода не зависит от его концентрации. Очевидно, что такие популяции при условии быстрого возобновления усвояемого ОВ могли бы уменьшить содержание кислорода в гипolimнионе до нуля в течение 3–4 месяцев стагнации. Однако не всё ОВ может быть использовано; в темноте вода длительное время может сохранять некоторое количество растворенного кислорода и при этом содержать трудноокисляемые органические вещества. Таким образом, присутствие соответствующего количества усвояемого ОВ играет важную роль в возникновении дефицита O₂.

Некоторое увеличение потребления кислорода около дна может быть объяснено наличием здесь усвояемых веществ, поступающих в воду из ила [Хатчинсон, 1969].

Микробиологические исследования эвтрофных водоемов показывают, что бактериальная деструкция ОВ, и, соответственно, потребление кислорода

растет пропорционально его общему количеству лишь при малых концентрациях. При росте первичной продукции и соответствующем обогащении вод усвояемым ОВ эта пропорциональность, в основном вследствие снижения концентрации РК, нарушается, а в особо неблагоприятных условиях происходит даже снижение скорости минерализации ОВ [Ризниченко, Рубин, 1993].

Низкие концентрации растворенного кислорода в поверхностных горизонтах могут быть следствием не только массового развития бактерий, но и фотохимического окисления.

Именно фотохимическое окисление приводит к возникновению дефицита кислорода в воде малопродуктивных водоемов, чьи воды насыщены гуминовыми органическими веществами. В продуктивных озерах разделить потребление кислорода на биохимическое и фотохимическое окисление практически невозможно, но в высокоцветных водоемах с низкой первичной продукцией нередко наблюдаются невысокие концентрации растворенного кислорода в поверхностных слоях в результате фотохимического окисления ОВ [Хатчинсон, 1969].

1.1.4. Обмен кислорода с донными отложениями

Донные отложения играют важную роль в кислородном режиме водоемов, и это вполне естественно, поскольку между водой и донными отложениями постоянно осуществляется обмен взвешенными и растворенными веществами [Романенко, Романенко, 1969]. В самих донных отложениях непрерывно происходят химические и микробиологические процессы, в которых расходуется O_2 . При этом нужно учитывать, что на 1 м^2 площади дна приходится в зависимости от пористости до 100 тыс. м^2 активной поверхности.

В зависимости от размеров водоема, его гидрологических и гидрохимических характеристик, трофического статуса и уровня антропогенной нагрузки на водоем влияние донных отложений на кислородный

режим может сильно различаться: в одних случаях потребление O_2 донными отложениями может заметно превышать его потребление в столбе воды, в других – составлять 45-50% [Несмеянов, 1950], а в третьих – иметь довольно скромный вклад в общий баланс [Денисова и др., 1987]. Отсюда ясно, что выявление роли донных отложений представляет собой важный этап в изучении кислородного режима водоемов.

При изучении динамики растворенного кислорода в придонном слое и в донных отложениях нужно учитывать следующие процессы [Chiario, Burke, 1980]:

- перенос O_2 в воде к поверхности донных отложений за счет турбулентной диффузии;
- диффузию O_2 в слое отложений (молекулярный процесс);
- дыхание микро- и макробентоса в аэробном слое;
- продукцию и высвобождение восстановленных веществ в аэробном слое отложений;
- диффузию этих веществ к поверхности раздела вода-дно;
- биологическое и химическое окисление восстановленных веществ гидробионтами в аэробном слое донных отложений, а также их адсорбцию;
- диффузию восстановленных веществ в придонный слой воды и их химическое окисление в этом слое.

Очевидно, что все эти процессы зависят от гидродинамики придонного слоя, температуры, физических характеристик донных отложений, освещенности, концентрации микро- и макроорганизмов и концентрации растворенного кислорода.

Скорость течения начинает оказывать влияние на интенсивность поглощения растворенного кислорода донными отложениями начиная с превышения некоторого предела придонной скорости течения. В различных источниках цифры сильно различаются: от 1–3 см/с до 10–20 см/с [Hill, Porcella, 1974; Hartwing, 1978]. Выше данной скорости возникает взмучивание верхнего

слоя донных отложений, что приводит к увеличению скорости потребления кислорода вследствие увеличения площади раздела фаз.

По результатам исследований влияния скорости течения на потребление кислорода грунтами (SOD) было предложено следующее уравнение (1.7) [Куслап, Эннет, 1983]:

$$SOD = SOD_0 + A(1 - e^{-\frac{U}{U_k}}) \quad (1.7)$$

где SOD_0 – потребление кислорода при отсутствии придонного течения, г/м²·сут; A – коэффициент, выражающий максимальный прирост SOD вследствие увеличения придонной скорости течения, г/м²·сут; U – придонная скорость течения, м/с; U_k – характерная скорость, при которой прирост SOD вследствие увеличения придонной скорости составляет 0,63A, м/с.

Температура также является важным фактором при рассмотрении интенсивности потребления растворенного кислорода донными отложениями. При увеличении температуры кислород потребляется грунтами более интенсивно. Однако приводящиеся в литературе количественные показатели этой зависимости чрезвычайно сильно различаются [Взаимодействие..., 1984; Мартынова, 1984; Мартынова, Жукова, Жуков, 1995; Мизандронцев, 1990; Edberg, Haffsten, 1973; Edwards, Rolley, 1965].

Для формализации зависимости скорости потребления O₂ грунтами дна чаще всего используется зависимость (1.8):

$$S_b(T) = S_b(20 \text{ }^\circ\text{C})\theta^{T-20} \quad (1.8)$$

где $S_b(20 \text{ }^\circ\text{C})$ – величина SOD при 20 °C, θ – температурный коэффициент, T – температура воды, °C.

При оценке влияния температуры на интенсивность потребления кислорода донными отложениями следует учитывать, что в условиях реальных

водоемов влияние температуры может нивелироваться другими факторами, которые бывает невозможно учесть в лабораторных экспериментах, что и создает чрезвычайно большой разброс получаемых результатов.

При исследовании потребления кислорода грунтами дна и его интенсивности нельзя не учитывать химические и биологические факторы. Потребление кислорода микроорганизмами и зообентосом донных отложений в совокупности с затратами на окисление восстановленных веществ и составляют суммарное значение SOD.

Бактерии в донных отложениях являются основными потребителями растворенного кислорода [Александрова, Ромова, 1977; Ломова, 1995; Сорокин, 1957; De With, Van Gemergen, 1990]. Характер субстрата во многом определяет активность бактерий. При этом более важна не толщина активного слоя донных отложений, а их состав. Чем более усвояемые органические вещества содержатся в верхнем активном слое донных отложений, тем выше будет потребление кислорода донными микроорганизмами.

Наряду с микрофлорой важным потребителем кислорода в донных осадках является макрозообентос. Ввиду своей подвижности, эти роющие организмы способствуют вовлечению в процесс потребления кислорода более глубоких слоев донных отложений [Страхов, 1962; Graneli, 1979; Kristensen, 1985; Lindeloom, Sanda, 1985], а также способствуют поступлению минеральных и органических веществ в воду.

Результаты исследований зависимости скорости потребления кислорода в грунтах от его содержания в придонном слое можно разбить на две основные группы: имеющие линейную зависимость практически во всём диапазоне концентраций O_2 и имеющие линейную зависимость только в диапазоне низких концентраций [Дзюбан, 1987; Haffner, Harris, Jarai, 1980; Lindeloom, Sanda, 1985; Martin, Bella, 1971].

Сезонные колебания содержания O_2 в придонном слое водоема изменяют окислительно-восстановительные условия в донных отложениях и тем самым влияют на величину SOD. Поток O_2 через поверхность донных отложений

обратно пропорционален мощности поверхностного окисленного слоя осадков, толщина которого зависит от концентрации O_2 на поверхности отложений.

Вклад потребления растворенного кислорода донными отложениями в общее потребление O_2 неодинаков в течение года. Многолетние исследования на Можайском водохранилище показали, что в зимний период его доля может достигать 40% от величины общей деструкции, тогда как в летний период – в два раза меньше [Ломова, 1995].

1.1.5. Плотностные течения

Плотностные течения, возникающие в водоемах, могут значительно изменять продольно-вертикальное распределение растворенного кислорода в них.

Механизм возникновения плотностных течений в озерах и водохранилищах бывает различен. В озерах, особенно в крупнейших озерах мира, расположенных в умеренной зоне, в период весеннего нагревания наблюдаются термогенные плотностные течения, которые вызваны неоднородностью прогрева мелководий и глубоководной части озер, что в результате приводит к возникновению уклона водной поверхности от берега к его центральной части. В результате плотностные течения переносят растворенный кислород в более глубокие области. Важную роль в данном случае играет и скорость самого течения. В случае низкой скорости кислород в стекающей по склонам озера воде будет потреблен донными отложениями, что приведет к увеличению объема вод с низким содержанием кислорода в наиболее глубоководной части [Rossolimo, 1935; Эдельштейн, Жидырева, Новикова, 1991].

В водохранилищах, особенно долинных, возникает другой тип плотностных течений, получивший название хемогенных [Эдельштейн, 2014]. Эти течения возникают в зимний период, когда влияние термогенного фактора почти отсутствует, и вызваны различием минерализации водных масс рек,

питающихся в этот период грунтовыми водами, и менее минерализованной основной водной массы водохранилищ. Скорость течения в таком случае тем выше, чем больше горизонтальный градиент плотности между ним и водой, под которую оно подтекает.

В летний период в стратифицированных водохранилищах при антициклоническом типе погоды возникают термохемогенные течения, имеющие смешанный генезис. Продолжительный приток высокоминерализованных речных водных масс и их смешение с водами гипolimниона приводят к возникновению пикноклина над русловой ложбиной и возникновению под ним термохемогенного течения.

В водохранилищах и большинстве озер плотностные течения играют важнейшую роль, перенося растворенный кислород в придонные горизонты, где в зимний и летний периоды может наблюдаться его дефицит, и тем самым создавая более благоприятные условия для существования гидробионтов.

1.2. Методы определения растворенного кислорода

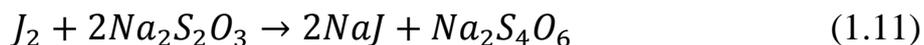
1.2.1. Метод Винклера

Йодометрический метод является самым старым из существующих в мировой практике и эталонным при определении растворенного кислорода в природных водах в мировой практике. Будучи разработанным в 1888 году [Winkler, 1888], он и в настоящее время является мировым и российским стандартом [ИСО 5813-83, РД 52.24.419-2005].

Метод основан на выделении свободного йода, количество которого эквивалентно количеству растворенного в воде кислорода.

Определение происходит в несколько этапов. На первом этапе растворенный кислород в пробе фиксируется в результате взаимодействия с хлоридом марганца $MnCl_2$ в щелочной среде и образования гидроокиси марганца $MnO(OH)_2$. На втором этапе определения происходит выделение

свободного йода, который оттитровывается раствором гипосульфита натрия $Na_2S_2O_3$. Реакции, протекающие на всех этапах определения (1.9–1.11), приводятся ниже.



В морской воде присутствуют компоненты, мешающие определению йодометрическим методом (NO_2^- , Fe^{3+} , Fe^{2+} , S^{2-} , NH_4^+ и др.), ввиду чего необходимо устранять мешающие воздействия или использовать модифицированный метод Винклера. В пресных водах мешающими воздействиями чаще всего можно пренебречь.

Погрешность метода по данным опубликованных исследований [Чернякова и др., 1983; Carrit, Carpenter, 1966; Codispoti, 1991; Culberson, 1994; ИСО 5813-83] варьирует в зависимости от концентрации растворенного кислорода в пробе. Нижний предел применения метода составляет 0,05 мг/л O_2 , при данной концентрации погрешность составляет около 30%. В диапазоне от 0,1 до 0,2 мг/л – 10–20%, далее до 1,7 мг/л – 3–5%, а выше 1,7 мг/л – 1%. В нормативном документе, разработанном Гидрохимическим институтом [РД 52.24.419-2005], указываются другие величины погрешности – 10% ниже 3 мг/л кислорода, 3,2% – выше 3 мг/л. Предел обнаружения кислорода йодометрическим методом согласно этому документу составляет 0,2 мг/л.

1.2.2. Электрохимические методы

Электрохимическое определение растворенного кислорода в воде производится при помощи электрода, покрытого мембраной, разработанного Л. Кларком в 1956 году. Позже был разработан еще один электрохимический метод с использованием гальванического электрода.

В случае полярографического датчика катод выполнен из золота, а анод – из серебра. Система замкнута в цепь внутри самого прибора, в котором на датчик подается постоянный ток напряжением 0,8 В, поляризующий оба электрода.

Электролит, находящийся под мембраной, позволяет электрическому сигналу проходить от катода к аноду. Далее этот сигнал идет к амперметру. Полярографический датчик работает по принципу определения вариаций электрического тока, возникающих из-за изменения парциального давления кислорода, в то время как потенциал остается постоянным – 0,8 В. Чем больше молекул кислорода проходит через мембрану и восстанавливается на катоде, тем больший ток определяется датчиком. С уменьшением концентрации кислорода падает и напряжение.

Химически данный принцип описывается как окисление серебра при восстановлении кислорода на золотом катоде: электрохимическая мембрана представляет собой полупроводниковый материал, натянутый на чувствительный элемент и отделяющий его от окружающей среды, одновременно пропуская внутрь датчика растворенные газы.

В гальваническом датчике катод обычно выполнен из серебра, а анод из цинка. Анод может быть сделан и из другого материала, например свинца. Этот датчик также выполнен в виде замкнутой цепи, но в отличие от полярографического для его работы не требуется постоянный ток. В такого рода датчике электроды настолько различны по составу, что поляризуют друг друга и восстанавливают молекулы кислорода без присутствия напряжения.

Два типа стандартных мембран представляют собой: мембрану, натягивающуюся на датчик и удерживаемую уплотнительным кольцом, а также крышку с уже натянутой мембраной, которая накручивается на датчик.

Электрохимические методы определения растворенного в воде кислорода также являются мировыми стандартами [ИСО 5814-84] и обладают большей экспрессностью по сравнению с титриметрическим определением. Именно с их появлением стало возможно подробно изучать пространственно-временные

поля растворенного кислорода. Однако у этих методов существуют и недостатки: качество измерений будет зависеть от степени циркуляции воды вокруг датчика и её перемешивания. Проба воды должна быть постоянно перемешана. При возникновении застойных условий показания будут существенно занижены.

Погрешность метода составляет 2% в диапазоне от 0 до 200% насыщения.

1.2.3. Оптический метод

Этот метод измерения содержания растворенного в воде кислорода основан на нахождении времени и интенсивности люминесценции чувствительной мембраны по эмпирическому соотношению. Молекулы растворенного кислорода уменьшают время и интенсивность люминесценции мембраны, созданной из тщательно подобранных химических элементов. Если в пробе воды нет молекул кислорода, то время и интенсивность люминесценции максимальны. Если растворенный кислород присутствует вблизи чувствительного элемента, то время и интенсивность люминесценции становится меньше. Тем самым параметры люминесценции обратно пропорциональны концентрации растворенного кислорода. Соотношение между парциальным давлением растворенного кислорода снаружи датчика и временем или интенсивностью люминесценции чувствительного слоя определяется уравнением Штерна-Фольмера (1.12):

$$I_0/I = 1 + k_q t_0 O_2 \quad (1.12)$$

где I_0 – интенсивность или время люминесценции без присутствия молекул O_2 , I – интенсивность или время люминесценции в присутствии молекул O_2 , k_q – коэффициент «гашения», t_0 – время люминесценции чувствительного слоя, O_2 – концентрация кислорода.

Однако, уравнение Штерна-Фольмера не строго линейно при высоких значениях концентрации кислорода, поэтому подвергается корректировке в современных приборах.

Погрешность метода составляет 1% в диапазоне от 0 до 200% насыщения воды кислородом.

Данный метод в настоящее время является наиболее удобным для сбора массового материала о содержании растворенного кислорода в природных водах ввиду отсутствия требований перемешивания воды вокруг датчика. Сопоставление синхронных измерений оптическим и электрохимическим датчиками показало существенное занижение содержания растворенного кислорода электрохимическим датчиком по сравнению с оптическим [The dissolved..., 2009] При этом лучшей сходимостью с методом Винклера характеризовались результаты измерений именно оптическим датчиком.

1.3. Типы распределения растворенного кислорода в водоемах

На вертикальное распределение растворенного кислорода в водной толще значительное влияние оказывает трофическое состояние водоема, определяющее уровень протекания в нём продукционно-деструкционных процессов.

Олиготрофные водоемы вследствие низкого содержания органических и биогенных элементов в воде характеризуются высоким содержанием растворенного кислорода во всей толще. Продукционные процессы в них тоже практически отсутствуют, в связи с этим вертикальное распределение O_2 определяется в основном гидрофизическими процессами.

Рост трофического статуса водоемов и увеличение в них органического вещества в их водах приводит к снижению содержания растворенного кислорода в гипolimнионе вплоть до его полного исчезновения. В фотической зоне из-за накопления в водоеме биогенных веществ всё интенсивнее начинает фотосинтезировать фитопланктон, происходит перенасыщение воды

кислородом. В то же время, чем интенсивнее протекают процессы фотосинтеза, тем быстрее кислород в гипolimнионе расходуется на окисление органических веществ.

В эвтрофных водоемах в конце летнего периода в гипolimнионе практически отсутствует кислород и наблюдается дефицит O_2 зимой вследствие его высоких затрат на деструкцию большого количества спродуцированного фитопланктоном за вегетационный период ОВ. В донных отложениях также накапливаются биогенные и органические вещества, вследствие чего интенсивное потребление кислорода в илах может наблюдаться уже вне зависимости от интенсивности протекания продукционных процессов в данный момент.

Наиболее широко применяемая в настоящее время классификация типов кислородного режима предложена Абергом и Родэ [Aberg, Rodhe, 1940] и основывается на стратификации толщи по содержанию O_2 .

Ортоградное распределение характерно для олиготрофных водоемов и определяется преимущественно гидрофизическими процессами. Может наблюдаться небольшое увеличение или уменьшение содержания кислорода с глубиной. Аналогичное распределение может обнаруживаться не только в олиготрофных, но и в полимиктических эвтрофных водоемах при полном летнем перемешивании водной толщи. Ортоградным распределением характеризуются крупные озера северной части ЕТР, а также арктические водоемы.

Клиноградный тип распределения O_2 характеризуется снижением содержания кислорода с глубиной вследствие потребления на дыхание и биохимическое окисление ОВ. В стратифицированных водоемах в периоды плотностного расслоения водной толщи наблюдается резкое уменьшение содержания O_2 в металимнионе, а в гипolimнионе он исчезает полностью. Данный тип распределения может наблюдаться в различных по трофности водоемах.

Гетероградное распределение кислорода характеризуется максимумом или минимумом в металимнионе. В случае, если наблюдается максимум, кривая называется позитивно-гетероградная и может наблюдаться в любом типе озер, кроме дистрофных, а если минимум – негативно-гетероградная, которая встречается в любом типе озер, кроме олиготрофных.

Выводы

Кислородный режим водоемов формируется в результате воздействия множества факторов: гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических. Важнейшими процессами, формирующими распределение растворенного кислорода, являются обмен с атмосферой, фотосинтез, биохимическое потребление в водной толще, а также грунтами дна. Каждый из перечисленных процессов чрезвычайно сложен, их формализации многочисленны, а количественные оценки зависимостей от определяющих факторов, полученные по данным натуральных и лабораторных экспериментов, сильно разнятся.

Помимо упомянутых выше процессов, в формирование кислородного режима водоемов вносят важный вклад плотностные течения.

Совокупность определяющих процессов приводит к формированию трех типов вертикального распределения O_2 : ортоградного, клиноградного и гетероградного.

Среди методов определения содержания растворенного кислорода в воде эталонным остается йодометрический метод Винклера, однако в последние 60 лет с появлением полярографических электродов, а не так давно и оптических датчиков, стал возможен сбор массового материала о содержании растворенного кислорода и подробное исследование кислородного режима водоемов натурными методами.

ГЛАВА 2. КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ ВОДОХРАНИЛИЩ МОСКВОРЕЦКОЙ ВОДНОЙ СИСТЕМЫ

2.1. Объекты исследования

Из всех водохранилищ – источников водоснабжения г. Москвы лишь в четырех наблюдается устойчивая температурная стратификация, приводящая к ежегодному возникновению неблагоприятных кислородных условий. Это водохранилища многолетнего регулирования стока, расположенные на западе Московской области: Можайское, Рузское, Озернинское и Истринское (рисунок 2.1). Они имеют сходные размеры водосборов, но отличаются по морфологическому строению и условиям биогенного питания их фитоценозов, что приводит к различающимся гидроэкологическим условиям формирования кислородного режима этих водоемов. Именно это послужило основанием для выбора их в качестве объектов исследования.

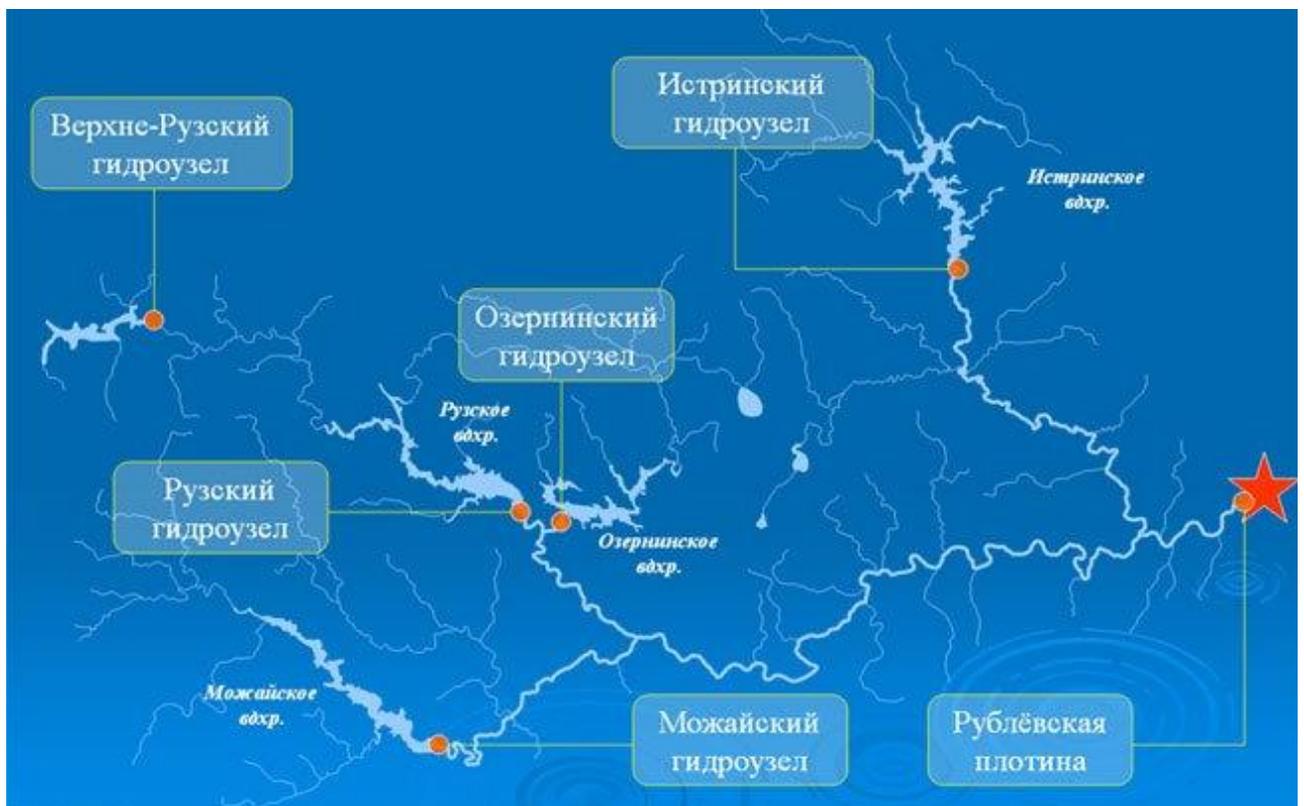


Рисунок 2.1 – Гидрографическая схема водохозяйственной системы (источник: www.mosvodokanal.ru)

Москворецкие водохранилища – водоемы долинного типа и среднего размера. Суммарная полезная емкость водохранилищ составляет 83% от среднего объема годового стока с общего водосбора. Вследствие большого коэффициента емкости в водохранилищах наблюдается замедленный водообмен и существенная трансформация речных вод, питающих их, в водные массы озерного типа.

Расположение гидроузлов в верховьях водосбора р. Москвы в очаге формирования стока системы, а также регламентация антропогенного воздействия на него позволяют проводить оценку влияния природных факторов на процессы, протекающие в водохранилищах.

Можайское водохранилище создано в долине р. Москвы в 1960 г. Бассейн водохранилища дренируется реками Москвой и Лусьянкой, а также р. Колочь, сток которой зарегулирован и поступает в водохранилище посредством перекачки Колочским гидроузлом.

Таблица 2.1 – Географо-гидрологические характеристики Можайского, Рузского, Озернинского и Истринского водохранилищ [Водоохранилища Москворецкой..., 1985]

		Можайское	Рузское	Озернинское	Истринское
Координаты:	с.ш.	55°35'	55°47'	55°46'	56°02'
	в.д.	35°50'	36°02'	36°12'	36°50'
Год сооружения	–	1960	1965	1966	1934
НПУ	м БС	183,00	182,50	182,50	170,00
УМО	м БС	170,00	169,00	169,00	158,60
Длина	км	28,2	32,8	19,2	22,2
Средняя ширина	км	1,1	1,0	1,2	1,5
Максимальная ширина	км	2,6	3,2	2,5	4,4
Средняя глубина	м	7,7	6,7	6,2	5,4
Максимальная глубина	м	22,6	21,2	20,5	23
Площадь зеркала	км ²	30,7	32,7	23,1	33,6
Площадь водосбора	км ²	1360	1140	733	1010
Объем водохранилища	млн м ³	235	220	144	183
в т.ч. полезный	млн м ³	221	216	140	171
Объем годового притока	млн м ³	296	217	146	211
Коэффициент водообмена	год ⁻¹	1,8	1,5	1,3	1,5

Этот водоем характеризуется наименьшей извилистостью береговой линии из всех рассматриваемых и относится к водохранилищам морфологически простого долинного подкласса [Эдельштейн, 2014]. Его акватория вытянута с северо-запада на юго-восток, в верховьях расположен устьевой залив р. Лусянки, а устьевые участки остальных притоков – р. Колочи и р. Бодни отсечены плотинами. Притоками дренируется более 90% водосбора (1204 км²), и лишь 9% (125 км²) составляет площадь бокового водосбора самого водохранилища.

Рузское водохранилище расположено на р. Рузе – левом притоке р. Москвы, гидроузел сооружен в 1965 г. Морфологически этот водоем можно отнести к тому же простому долинному типу, что и Можайское водохранилище, однако оно более извилисто из-за длинного приустьевого залива в долине р. Волошни (в верховьях) и двух заливов в приплотинном районе, в месте впадения малых рек – Правой илевой Педни. В 1982 году на реке Рузе выше по течению создано еще одно водохранилище – Верхнерузское, в которое осуществляется перекачка воды из Вазузской гидротехнической системы (ВГТС) при недостатке водных ресурсов в водоемах Москворецкой водной системы. И, хотя сток с одной трети водосбора зарегулирован (площадь водосбора р. Рузы в створе Верхнерузского гидроузла $F = 325 \text{ км}^2$), в настоящее время перекачка из Яузского водохранилища ВГТС осуществляется крайне редко.

До 1994 года на р. Рузе существовал гидрометрический пост у д. Красное Село ($F = 339 \text{ км}^2$), однако в настоящее время он закрыт, и на водосборе остался лишь один пост на р. Волошне в деревне Чертаново ($F = 91,2 \text{ км}^2$). Таким образом, в совокупности с площадью водосбора Верхнерузского водохранилища сток только с 37% бассейна освещен данными гидрометрических наблюдений.

Озернинское водохранилище относится к типу морфологически сложных долинных водохранилищ. Водохранилище создано в 1967 г. на крупнейшем левом притоке нижней р. Рузы – р. Озерне, вытекающей из озера Тростенское,

что приводит к естественному регулированию её стока. Водохранилище извилисто и имеет изрезанную береговую линию из-за впадения рек и ручьев, к крупнейшим из которых относятся реки Вейна и Хлынья, образующие крупные заливы. Это самый малый из исследуемых водоемов и по площади водосбора, и по площади водного зеркала, и по объему, а также наименее проточный (коэффициент водообмена $K_v = 1,3$).

На реке Озерне с 1955 г. действует пост в д. Городище ($F = 364 \text{ км}^2$), остальные притоки водохранилища не освещены данными гидрометрических наблюдений. Таким образом, изучен сток только с половины (51%) водосбора; однако, это больше, чем для водосборов Рузского и Истринского водохранилищ.

Истринское водохранилище – морфологически самый сложный водоем долинного типа из рассматриваемых, со значительными по размерам акватории извилистыми заливами в долинах рек Чернушки, Нудоли, Катыша и Катышки. Водохранилище создано в 1935 г. на р. Истре (её длина до впадения в водохранилище $L = 26,5 \text{ км}$, площадь водосбора $F = 174 \text{ км}^2$). Объем водохранилища 183 млн м^3 , площадь водной поверхности при НПУ $33,6 \text{ км}^2$, длина $22,2 \text{ км}$, максимальная глубина в пределах приплотинного плеса 23 м [Водохранилища..., 1985]. Водохранилище слабо проточно (средний водообмен $K_v = 1,5 \text{ год}^{-1}$), большую часть года стратифицировано, осуществляет многолетнее регулирование стока [Эдельштейн, 1998]. Основные притоки, имеющие данные гидрометрических наблюдений – р. Нудоль – в/п Кузнецово ($F = 291 \text{ км}^2$) и р. Катыш – в/п Троицкое ($F = 70,5 \text{ км}^2$). Площадь всего водосбора водохранилища составляет 976 км^2 , из них только 362 км^2 (37%) освещены данными гидрометрических наблюдений.

Гидрологический режим рек московского бассейна, обеспечивающих наполнение водохранилищ, характеризуется в целом четко выраженным весенним половодьем, низкой летней меженью, прерываемой дождевыми паводками, и продолжительной зимней меженью. В меженный период попуски

из водохранилищ играют ведущую роль в поддержании гарантированных водозаборов Рублевской и Западной водопроводных станций.

В структуре водного баланса основных водохранилищ системы приток воды с водосбора составляет около 92%, оставшуюся часть притока воды дают осадки на водную поверхность (7%) и возврат воды после затопления осевшего на берегах льда [Ершова и др., 1999]. Аналогично соотношению и в расходной части баланса между сбросом воды в нижний бьеф, испарением и потерями с осевшим на берегах льдом. Средний слой испарения с поверхности водоемов 450–500 мм/год. Поскольку все водохранилища Москворецкой системы – водоемы многолетнего регулирования речного стока, они имеют очень замедленный водообмен и невысокие значения среднего показателя проточности: в Озернинском и Истринском водохранилищах – 61–66 м/сут, в Можайском и Рузском – 105–107 м/сут. Скорости стоковых течений не превышают в межень 1–2 см/с. Ветровые течения непродолжительны и ограничены пределами отдельных плесов. При средней скорости ветра 3–5 м/с их скорость обычно не превышает 10 см/с. Летом и зимой хорошо выражен слой температурного скачка. Благодаря замедленному водообмену и относительной глубоководности в москворецких водохранилищах периодически возникают плотностные течения.

В зависимости от сезона года прозрачность воды в водохранилищах колеблется в пределах 0,3–5,0 м. Весной из-за повышенных концентраций аллохтонных взвесей и «цветения» диатомовых водорослей она составляет 0,5–1,3 м. В начале лета, с окончанием «цветения» и после осадения взвесей она увеличивается до 3–4 м – наступает так называемая «фаза чистой воды», обусловленная фильтрационной активностью дафний. С массовым развитием летнего фитопланктона прозрачность воды снижается до минимальных значений, осенью вновь увеличивается в результате его отмирания и осадения.

Москворецкие водохранилища обладают большим отстойным эффектом, аккумулируя до 90% взвешенных веществ. Тем не менее, средняя скорость их

заиления не превышает 0,5 см/год. Донные отложения представлены в основном мелкоалевритовыми песчанистыми серыми илами (фракции с диаметром < 0,01 мм составляют около 50%) с содержанием органического вещества 6–8%.

Состав воды во всех водохранилищах карбонатного класса кальциевой группы переходного (I–II) типа (гидрохимическая фация $\text{HCO}_3\text{--Ca--Mg}$) с минерализацией от 90 мг/л весной до 530 мг/л в зимний период. Средняя минерализация воды, сбрасываемой в нижний бьеф водохранилищ, 200–290 мг/л. Содержание органических веществ в воде сравнительно невелико: бихроматная окисляемость, как правило, не превышает 40 мг О/л, перманганатная окисляемость – 12 мг О/л, цветность – 100 град Cr-Co. Их среднегодовые значения составляют, соответственно, 11–22 мг О/л, 6,5–9,0 мг О/л и 17–38 град Cr-Co [Ершова и др., 1999].

Для внутригодовых колебаний концентраций биогенных элементов характерны зимне-весенний максимум и летний минимум. Содержание общего фосфора во всех водохранилищах изменяется в пределах 0,01–0,64 мг/л, минерального фосфора – от 0,01 до 0,54 мг/л. Основная часть микроэлементов содержится в диапазоне концентраций, характерных для атмосферных и грунтовых вод водосборных бассейнов.

Внутригодовой режим растворенного в воде кислорода определяется особенностями гидродинамических и продукционно-деструкционных процессов в водохранилищах. Весной во время изотермии его содержание составляет 75–95% насыщения от поверхности до дна. Летом в эпилимнионе до глубины 6–8 м содержание кислорода постоянно высокое (> 70%). В поверхностном слое при интенсивном фотосинтезе фитопланктона его содержание в отдельные дни может превышать 200% насыщения. В гипolimнионе с момента его образования начинается быстрое уменьшение содержания кислорода со скоростью, достигающей 400–500 мг/(м³·сут). Максимальные вертикальные градиенты снижения концентрации кислорода обычно совпадают со слоем температурного скачка. В конце лета в пробах

воды из придонных горизонтов средней и нижней части водохранилищ нередко отмечается запах сероводорода. Размеры летних зон аноксии, наблюдаемых практически ежегодно, изменяются в зависимости от гидрометеорологических условий года. Осеннее перемешивание приводит к выравниванию содержания растворенного кислорода по глубине и повышению его концентрации от 60–70% до 90–95% насыщения в момент замерзания водохранилищ. Зимой вновь образуется кислородная стратификация. К концу зимы в подледном горизонте содержание кислорода уменьшается до 50–70%, а в придонных слоях глубоководных участков – менее 10% насыщения.

Все четыре водохранилища – слабоэвтрофные водоемы. В них регулярно наблюдается «цветение» воды в течение 1,5–2 летних месяцев, достигающее в отдельные годы высокой степени интенсивности – биомасса фитопланктона достигает 10 мг/л и более. Валовая продукция фитопланктона за вегетационный период колеблется в широких пределах: 90–410 г С/м². Средняя концентрация хлорофилла в поверхностном слое воды в летние месяцы находится в пределах 13–67 мкг/л. Для всех водохранилищ характерна сезонная сукцессия планктонного сообщества, детально прослеженная на Можайском водохранилище, где в течение ряда лет проводились еженедельные наблюдения [Сахарова, Соколова, Эдельштейн, 1993]. Эти исследования выявили четко выраженные и ежегодно повторяющиеся внутрисезонные изменения экологического состояния планктона, характерные для мезотрофных и эвтрофных озер умеренных широт.

В развитии фитопланктона ежегодно наблюдается весенний пик (до 2,6 мг/л) диатомовых мелкоклеточных водорослей с преобладанием *Stephanodiscus hantzschii*. За ним всегда следует высокий раннелетний пик зоопланктона (до 7–9 мг/л). Увеличение биомассы зоопланктона связано с доминирующим видом кладоцер-фильтраторов – крупной *Daphnia galeata*, хотя в большинстве случаев доминируют всё же несколько более мелкие виды ветвистоусых рачков. Пик численности дафний всегда совпадает с минимумом (менее 0,1 мг/л) биомассы фитопланктона. В июле–сентябре обычно

наблюдается развитие колониальных и крупноклеточных форм фитопланктона – цианобактерий *Aphanizomenon flosaquae*, *Anabaena flosaquae*, *Microcystis*. В 80–90-х годах прошлого века в Можайском водохранилище наблюдались мощные вспышки «цветения» пиррофитовых водорослей *Ceratium hirundinella* – с биомассой до 18–24 мг/л. При этом биомасса зоопланктона невысока (1–2 мг/л). В конце «цветения» или после его окончания иногда наблюдается незначительный подъем численности зоопланктона и увеличение его биомассы. Биомасса бентоса в водохранилищах достаточно стабильна и составляет в среднем 3–5 г/м².

2.2. Материалы и методы полевых исследований

Кислородный режим Москворецких водохранилищ достаточно хорошо изучен. Благодаря существованию Межфакультетской комплексной экспедиции по изучению водохранилищ в 70-е годы, а также Красновидовской лаборатории по изучению водохранилищ с середины 60-х гг. полевые наблюдения проводились практически с момента заполнения Рузского, Озернинского и Можайского водохранилищ. За это время был собран большой объем данных, позволяющий оценить не только временную, но и пространственную неоднородность характеристик качества воды. Однако в монографиях [Можайское..., 1979; Водохранилища Москворецкой..., 1985] отмечены лишь самые общие черты кислородного режима этих водоемов.

В настоящей работе обобщаются все имеющиеся данные полевых наблюдений за содержанием растворенного кислорода по исследуемым объектам.

Для качественного и количественного анализа данных отобраны результаты всех гидролого-гидрохимических съемок, в которых проводилось определение содержания растворенного кислорода. Стоит отметить, что до появления в распоряжении исследователей оксиметров в 1974 году сбор

массового материала был затруднен, а данные за этот период крайне скудны, в связи с чем они учитывались при анализе, но не учитывались при расчетах.

Самый обширный архив материалов имеется для Можайского водохранилища. Отобранные результаты съемок за несколько периодов: 1974–1985 гг., 1996–2000 гг., 2010–2013 гг. включают данные двух годовых циклов балансовых исследований, в рамках которых охвачены все фазы водного режима и подробно охарактеризованы кислородные условия.

Для Рузского, Озернинского и Истринского водохранилищ массив данных наблюдений не столь обширен (таблица 2.2). Особенно ценны материалы квазисинхронных съемок всех четырех водоемов, так как только такие исследования позволяют оценить различия в кислородных условиях между ними при одинаковых гидрометеорологических условиях.

Таблица 2.2 – Годы проведения гидролого-гидрохимических съемок на Рузском, Озернинском и Истринском водохранилищах (оранжевым выделены годы проведения квазисинхронных наблюдений на всех четырех водохранилищах системы, включая Можайское)

Рузское	Озернинское	Истринское
1974	1974	1974
1975	1975	1975
1977	1977	1977
1981		1991, 1998, 1999
2000	2000	2000
2013	2013	2013

Временная изменчивость вертикального распределения растворенного кислорода оценивалась по данным учащенных наблюдений на рейдовой вертикали Можайского водохранилища за периоды 1998–2002 гг. и 2010–2012 гг. Для остальных водохранилищ подобных наблюдений не проводилось.

Контроль качества воды Москворецких водохранилищ проводится и лабораториями ОАО «Мосводоканал», однако недостаточный пространственный охват мониторинговой сетью всей водной толщи водохранилищ и низкая частота отбора проб не позволяет использовать накопленные материалы для репрезентативной характеристики кислородного режима водоемов.

2.3. Режим растворенного кислорода в изучаемых водохранилищах

Объекты исследования имеют сходные черты кислородного режима. В весенний период после освобождения водоемов ото льда в водной толще начинают активно развиваться динамические процессы, благодаря которым происходит обогащение водной толщи растворенным кислородом и выравнивание его содержания по вертикали при 80–90% насыщения. Однако результатами наблюдений зафиксированы и случаи неполного вертикального перемешивания вод в наиболее глубоководных приплотинных районах водохранилищ. Так, в Можайском водохранилище в конце апреля 1984 г. в придонном горизонте у плотины содержание растворенного кислорода составляло 0,8 мг/л или 5% насыщения (рисунок 2.2), а весной 1974 г. – около 50%. Аналогичная ситуация наблюдалась и в Рузском водохранилище в конце марта 1973 и 1976 гг., когда в приплотинном участке у дна концентрация растворенного кислорода также не превышала 5–10% насыщения, хотя по результатам съемки весной 1975 г. во всём водоеме было зафиксировано полное перемешивание водной толщи.

Во второй половине весны в водохранилищах начинает формироваться плотностная стратификация водной толщи, которая приводит и к её расслоению по содержанию растворенного кислорода. Одновременно с этим в поверхностных слоях начинают развиваться диатомовые водоросли, фотосинтез которых нередко приводит к пересыщению воды растворенным кислородом. Так, результатами съемки 16 мая 2012 г. отмечено пересыщение

эпилимниона Можайского водохранилища кислородом (рисунок 2.3), максимальные значения зафиксированы у плотины и достигали 140% насыщения. Похожая ситуация наблюдалась в водохранилище и в 1984 г., когда

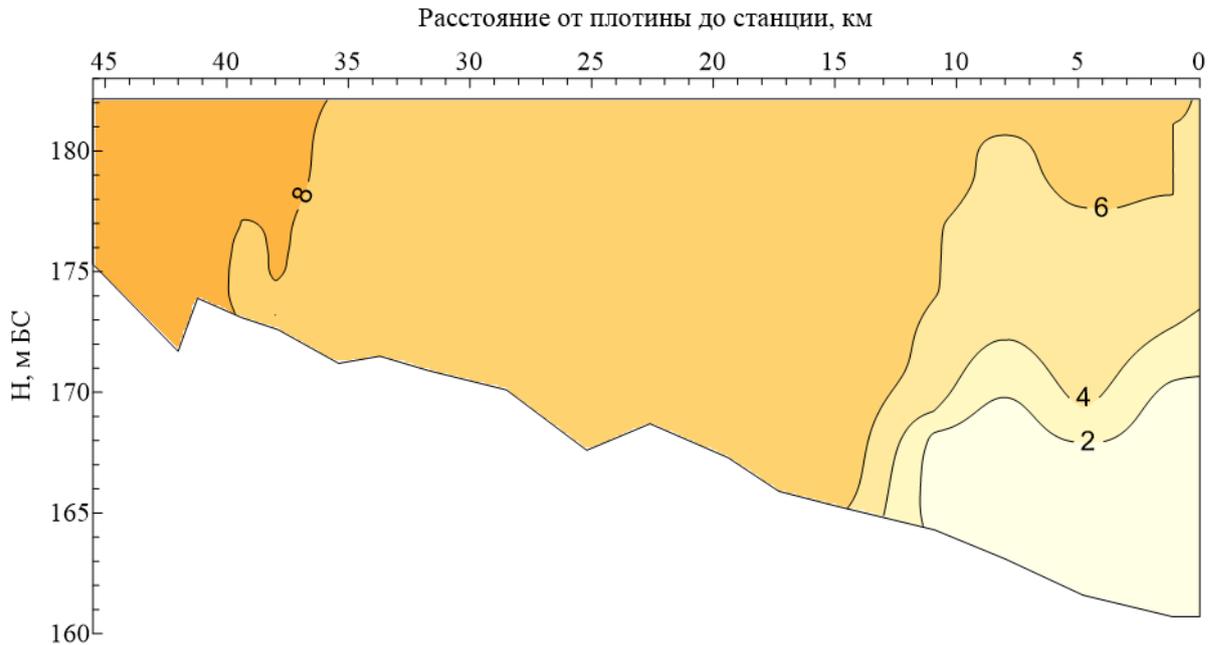


Рисунок 2.2 – Распределение растворенного кислорода в Можайском водохранилище (мг/л) по данным съемки 27.04.1984 г.

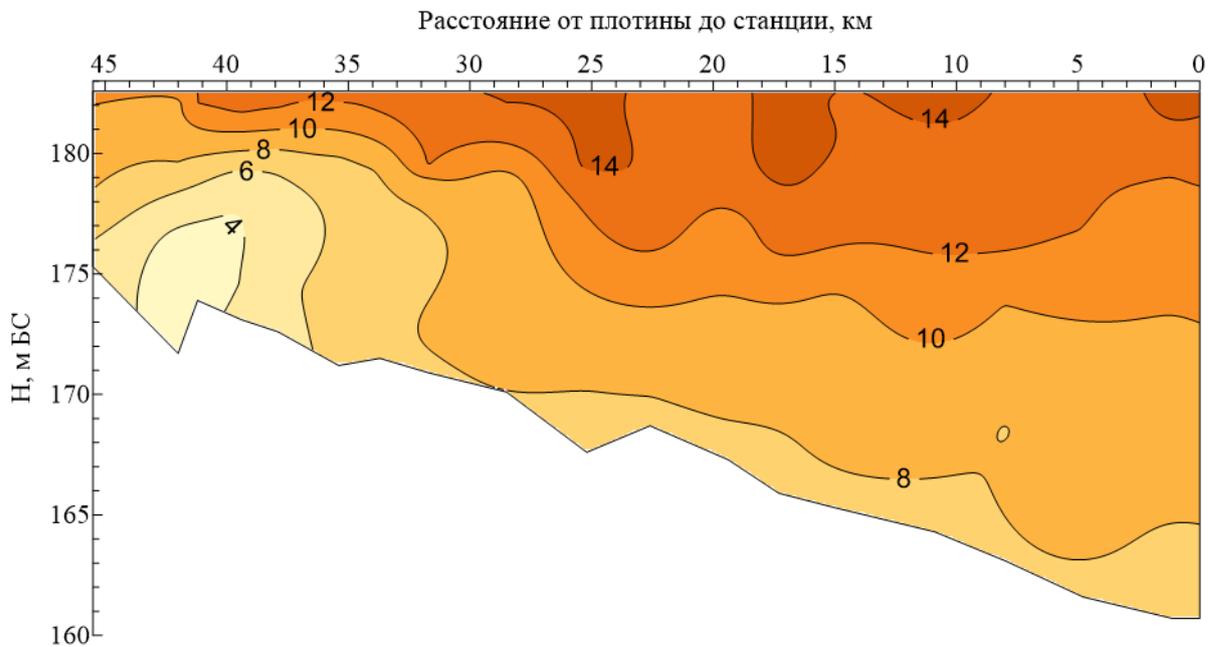


Рисунок 2.3 – Распределение растворенного кислорода в Можайском водохранилище (мг/л) по данным съемки 16.05.2012 г.

в конце мая в приплотинном районе в поверхностных слоях содержание кислорода составляло 110–120% насыщения. Аналогичные значения были зафиксированы и в поверхностном слое Озернинского и Рузского водохранилищ в мае 1973 г., причем в Рузском водохранилище превышение 100% наблюдалось в верховьях, а в Озернинском 120% насыщения кислородом – в приплотинном районе. В Истринском водохранилище также зафиксировано пересыщение растворенным кислородом по данным майских съемок 1973 и 1974 гг., в оба года продукционные процессы протекали довольно активно во всех районах водохранилища, максимальные наблюдаемые концентрации достигали 130% насыщения.

В летний период кислородный режим водохранилищ определяется двумя основными факторами: стратифицированностью водной толщи и интенсивностью продукционно-деструкционных процессов. Фотосинтез играет важнейшую роль в формировании кислородных условий эпилимниона. В отдельные штилевые дни в летний период содержание кислорода в поверхностных слоях может достигать 160–180% насыщения.

Так, съемками Москворецких водохранилищ во второй половине июня 1973 г. отмечено пересыщение кислородом поверхностных горизонтов от 110–120% в Рузском, Озернинском и Можайском до 150% в Истринском. При этом в середине августа этого же года превышение 100% насыщения было обнаружено лишь в Истринском водохранилище, в котором содержание кислорода в поверхностном слое по сравнению с июнем не изменилось.

В 1974 г. в конце июня в верховьях Рузского водохранилища наблюдалось пересыщение поверхностных слоев растворенным кислородом до 150%, хотя в центральном и приплотинном районах концентрации не превышали 80–90%. Аналогичная ситуация наблюдалась в это время и в Озернинском водохранилище, в верховьях которого содержание O_2 составляло 140% насыщения, а в приплотинном районе и устьевом заливе р. Хлыньи – 105–110%. В Можайском водохранилище в это время наблюдались тенденции, сходные с отмеченными в Озернинском, а по данным гидролого-

гидрохимической съемки Истринского водохранилища в это время на всех станциях содержание кислорода составляло 130–150% насыщения. К концу первой декады августа ситуация изменилась: Можайское, Рузское и Озернинское водохранилище в это время находились в перемешанном состоянии (за исключением самых глубоководных участков) и активной вегетации планктона в них не наблюдалось, содержание кислорода у поверхности составляло 80–90% насыщения. В Истринском водохранилище температурная стратификация не была нарушена, однако и в нём содержание РК не достигало насыщения.

В 2000 г. двумя сериями квазисинхронных съемок водохранилищ были выявлены сходные тенденции изменений кислородных условий. В конце июня – начале июля в эпилимнионе водохранилищ наблюдалось пересыщение воды кислородом: до 120% в Озернинском (за исключением приплотинного района), до 115% в верховьях Рузского, в Можайском концентрации находились в пределах 80–90% насыщения. В Истринском водохранилище продукционные процессы протекали наиболее активно – в верховьях отмечались значения до 215% насыщения, а у плотины – 140–150%. В конце июля, спустя месяц, наблюдалась уже совсем иная картина: в Истринском водохранилище у поверхности содержание кислорода составляло около 70–80% насыщения, в Рузском интенсивность процессов не изменилась, зато в Озернинском водохранилище содержание кислорода составляло 110–130% насыщения, а в центральной и приплотинной части Можайского водохранилища достигало 145%.

Последний цикл съемок, выполненный в июне и августе 2013 г., выявил более активное протекание продукционных процессов в этом году по сравнению с 1974–1975 и 2000 гг., выразившееся в большем насыщении воды водохранилищ растворенным кислородом. Так, в Можайском водохранилище в середине июня максимальное пересыщение (160%) наблюдалось в верховьях, тогда как в середине августа более обогащены кислородом (140%) были поверхностные горизонты центрального и приплотинного районов. В Рузском

водохранилище в 2013 г. продукционные процессы протекали довольно равномерно по акватории; в июне содержание кислорода у поверхности составляло 110–120% насыщения, а в августе – 130–140%. В Озернинском водохранилище содержание кислорода в поверхностных слоях в обе съемки не превышало 105–110%. Максимальное содержание растворенного кислорода по-прежнему отмечалось в Истринском водохранилище, достигая в июне 185% насыщения в Нудольском заливе и 120–130% у плотины, в августе – немного меньших значений: до 160–175% в заливах рек Нудоль и Катыш и до 110% в приплотинном районе.

В то же время, чем интенсивнее происходит фотосинтез, тем больше кислорода расходуется в гипolimнионе на окисление спродуцированного фитопланктоном органического вещества. Наличие слоя температурного скачка почти полностью прекращает вертикальный обмен эпилимниона с нижележащими горизонтами, и в антициклоническую погоду единственным источником поступления растворенного кислорода в придонную водную массу становятся течения. Однако интенсивность расходования кислорода всё равно сильно превышает интенсивность его поступления. Поэтому летом происходит постепенное истощение запасов кислорода в гипolimнионе, а к концу лета он может исчезать там полностью (рисунок 2.4).

Данные наблюдений за содержанием кислорода в Можайском водохранилище за всё время его существования показывают, что бескислородные условия в нём возникают каждый год. Но особенности формирования, развития и продолжительность существования обедненных O_2 водных масс существенно различаются в зависимости от гидрометеорологических условий.

Наиболее интересно рассмотреть изменение кислородных условий во всех четырех исследуемых водоемах по результатам квазисинхронных серий съемок, так как они позволяют оценить особенности формирования

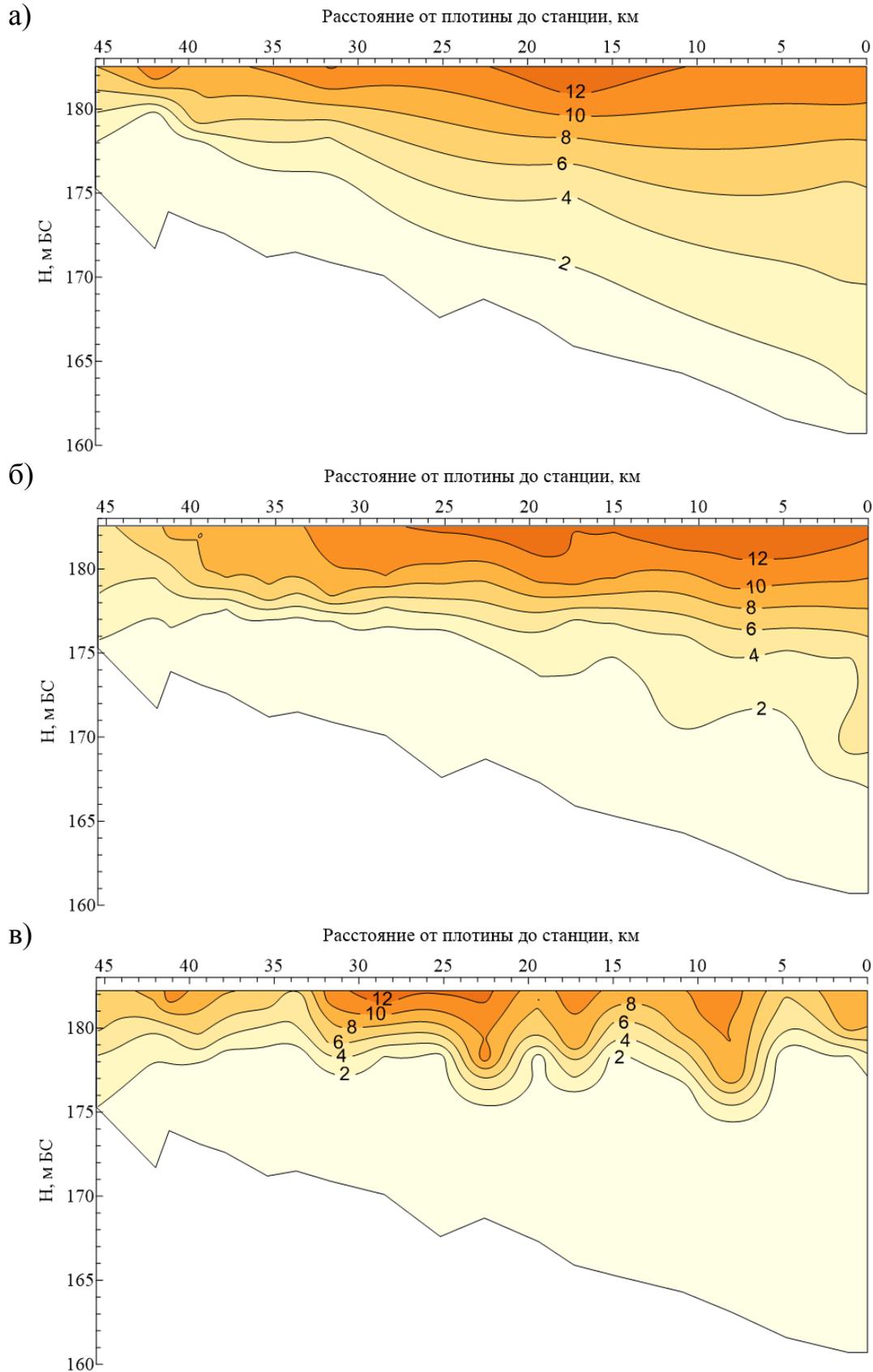


Рисунок 2.4 – Распределение растворенного кислорода в Можайском водохранилище (мг/л) по данным съемок а) 25.06.2012 г.; б) 10.07.2012 г.; в) 07.08.2012 г.

гипоксидных зон водоемов. Возникновение и развитие таких зон в водохранилищах было зафиксировано циклом съемок в августе 1973 г., однако отбор лишь двух проб на станции (у поверхности и у дна) не позволяет оценить толщину гипоксидного слоя. В Истринском водохранилище в придонных горизонтах содержание кислорода изменялось от 5 до 20% насыщения, в Рузском – от 0 до 7%, однако только в центральном и приплотинном районах, так как верховья в это время находились в достаточно перемешанном состоянии, в Озернинском и Можайском водохранилищах резкий дефицит кислорода (менее 20%) также наблюдался лишь в центральных и нижних районах.

В 1974 г. летние съемки осуществлялись уже с помощью оксиметров, поэтому появилась возможность оценить толщину гипоксидных слоев в исследуемых водоемах. Во время серии съемок в середине июня в Рузском водохранилище была отмечена резкая стратифицированность верхнего района, в котором толщина слоя с содержанием РК менее 10% насыщения составляла 5–6 м, к центральной и нижней части водоема уменьшаясь до 2 м. В верховьях Можайского водохранилища в придонном двухметровом слое также было отмечено чрезвычайно низкое содержание растворенного кислорода, но зато в центральном и приплотинном районе минимальные значения не опускались ниже 30%. В Истринском и Озернинском водохранилищах наблюдались тенденции, сходные с Можайским. Вторая съемка в августе показала, что верховья и центральные районы Можайского, Озернинского и Рузского водохранилищ находятся в перемешанном состоянии и в них не наблюдается содержания кислорода ниже 50% насыщения даже у дна. Однако наиболее глубоководные районы водоемов сохранили стратифицированность, толщина слоя с содержанием РК менее 10% в них достигала 5–7 м. В Истринском водохранилище содержание растворенного кислорода у дна составляло на всех станциях не выше 5%, при этом толщина слоя с резким дефицитом O_2 увеличивалась от верховьев к плотине, где достигала 6 м.

Обследования летом 2000 г. показали, что в Рузском водохранилище гипоксидная водная масса толщиной 2–5 м в конце июня занимала верховья водохранилища, а спустя месяц сместилась в центральную часть водоема. В приплотинном районе содержание растворенного кислорода по данным двух съемок не опускалось ниже 35% насыщения.

В Озернинском и Можайском водохранилищах по результатам первой серии съемок обедненные растворенным кислородом воды занимали центральную и приплотинную части, и если в Озернинском водохранилище ко второй съемке толщина гипоксидного слоя не изменилась и составляла 5–7 м, то в Можайском её мощность возросла от 2 м в конце июня до 6 к началу августа. В Истринском водохранилище также было отмечено увеличение мощности слоя с резким дефицитом РК от 1 до 4 м в верховьях и от 5 до 8 м в центральном и нижнем районах.

В 2013 г. были отмечены наиболее яркие изменения между двумя сериями съемок Москворецких водохранилищ. В Рузском водохранилище в июне гипоксидная водная масса имела толщину до 5 м, занимая верховья и центральную часть водохранилища, а в середине августа – 2–3 м в верховьях, 5–7 м в центральной части и 9 м в приплотинном районе. В Озернинском водохранилище гипоксидная зона характеризовалась чуть меньшей толщиной: 2–3 м в верхнем и центральном районах в июне, распространилась затем на всё водохранилище, достигнув максимальной мощности 8 м в приплотинном районе в августе. В Можайском водохранилище четко прослеживалось перемещение зоны с дефицитом кислорода из верховьев в июне к центральной и нижней части, где в середине августа толщина слоя с содержанием РК менее 10% насыщения достигала 10 м.

В Истринском водохранилище уже в середине июня в приплотинном участке обнаружен 10-метровый слой с содержанием растворенного кислорода менее 20% насыщения, толщина которого за 2 месяца возросла до 13 м, а в мелководных заливах Нудоли, Катыши и в центральном районе составляла 4–6 м.

Приведенные описания изменений полей содержания растворенного кислорода в эпилимнионе и гиполимнионе позволяют сделать некоторые выводы об особенностях кислородного режима рассматриваемых водохранилищ в летний период.

Самыми неблагоприятными условиями отличается Истринское водохранилище, здесь наблюдаются и максимальные пересыщения кислородом поверхностных горизонтов вследствие фотосинтеза фитопланктона, и наибольшая среди рассматриваемых водоемов толщина слоя с резким дефицитом РК, являющаяся следствием высокой продуктивности водоема.

Примерно одинаковы кислородные условия в Рузском и Озернинском водохранилищах, при этом в Рузском зачастую наблюдаются бóльшие концентрации у поверхности и большой объем гипоксидной водной массы в гиполимнионе. Наиболее благоприятными условиями характеризуется Можайское водохранилище.

В осенний период из-за оттока тепла из водоемов химико-биологические процессы в них замедляются, источниками поступления кислорода остаются аэрация и речной приток, расходование происходит на деструкцию органического вещества автохтонного и аллохтонного происхождения. В это время вновь активизируются динамические процессы, которые приводят к постепенному выравниванию содержания растворенного кислорода по вертикали. В пространственном разрезе обогащение водной толщи кислородом происходит сначала в верховьях водохранилищ из-за меньшей глубины, а затем постепенно распространяется на более глубоководные участки. Так, в Можайском водохранилище по данным съемок концентрация РК осенью составляет от 80 до 100% насыщения, а содержание в придонных слоях редко (и не более, чем на 10%) ниже, чем у поверхности (рисунок 2.5).

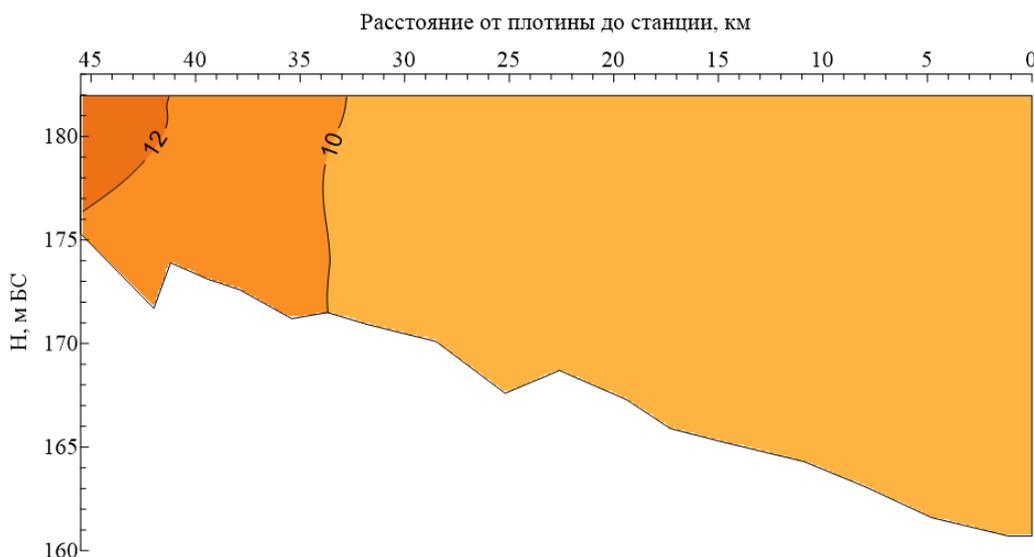


Рисунок 2.5 – Распределение растворенного кислорода в Можайском водохранилище (мг/л) по данным съемки 01.11.2012 г.

Наблюдения на Рузском, Озернинском и Истринском водохранилищах в 1973–1974 гг. свидетельствуют об аналогичных закономерностях. Вертикальная равномерность содержания растворенного кислорода в водоеме сохраняется до момента установления ледостава.

Зимой, после установления ледостава, прекращается газообмен поверхности водоема с атмосферой. Вследствие формирования зимней температурной стратификации водохранилищ сильно затрудняется или совсем прекращается поступление насыщенных кислородом поверхностных вод в глубинные слои. Поэтому содержание растворенного в воде водоемов кислорода постепенно снижается как в поверхностном, так и в придонном горизонтах (рисунок 2.6) в результате процесса деструкции органического вещества аллохтонного и автохтонного, спродуцированного в водохранилище в летний период.

Распределение O_2 неоднородно в зимний период и вдоль продольной оси водохранилищ: в начале зимы наименьшее содержание растворенного в воде кислорода наблюдается в верховьях водоемов, так как они в это время заполнены речными водами. У поверхности концентрация кислорода, как правило, увеличивается к плотине, тогда как в придонном горизонте

наблюдается обратная ситуация: содержание в воде кислорода уменьшается по мере приближения к плотине. В конце декабря – начале января содержание растворенного кислорода в поверхностном горизонте водохранилищ изменялось от 45–49% (в верхних районах Рузского и Озернинского) до 94–95% насыщения. Придонные горизонты уже в начале зимнего периода характеризуются заметно меньшим содержанием кислорода: от 10% (приплотинный участок Рузского водохранилища) до 50% насыщения.

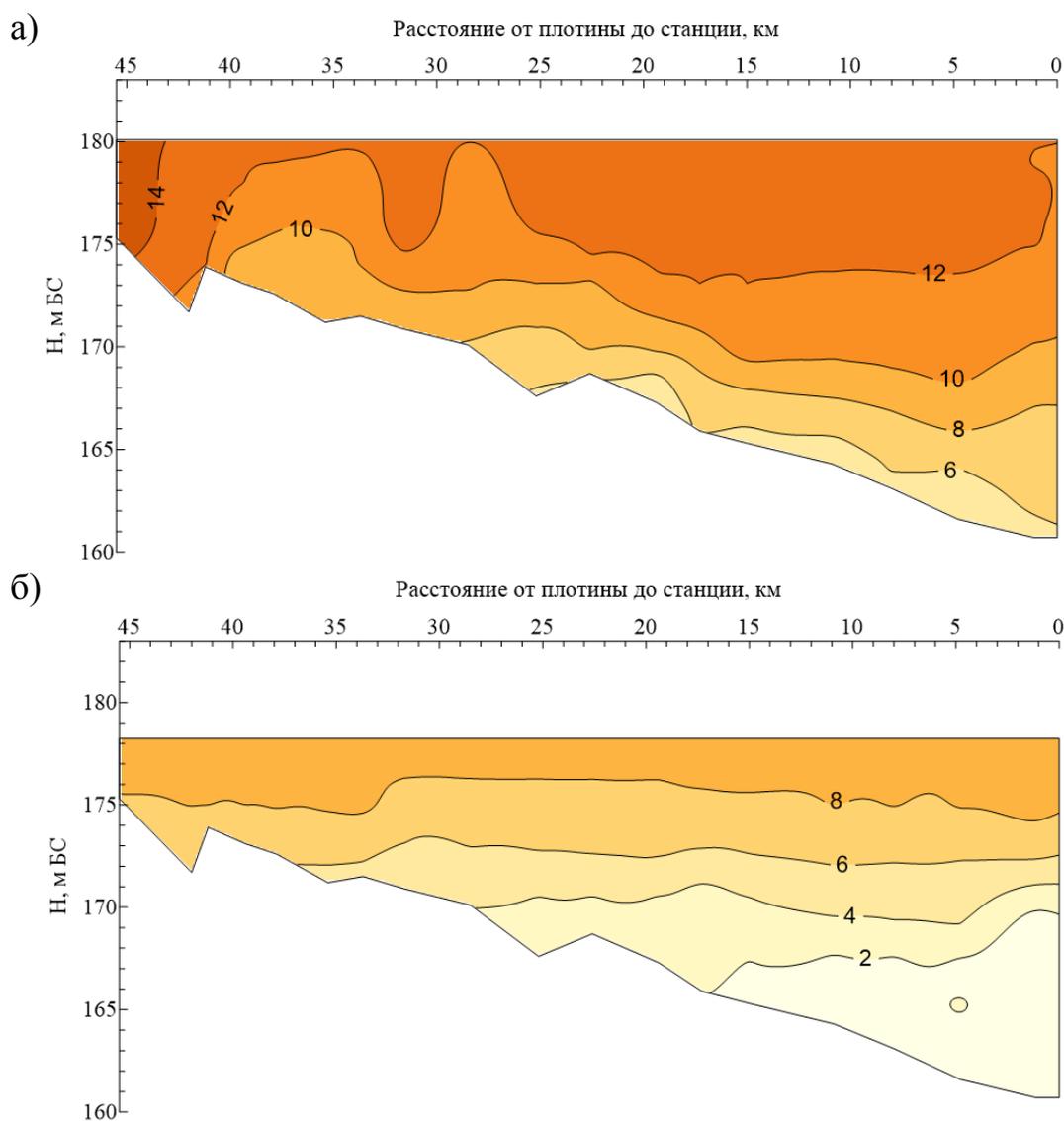


Рисунок 2.6 – Распределение растворенного кислорода в Можайском водохранилище (мг/л) по данным съемки а) 28.12.1983 г.; б) 12.03.1984 г.

В начале зимы, до образования на льду снежного покрова, в поверхностном слое воды возможно подледное «цветение» водорослей

[Орлеанская, 1978]. К таким же выводам приходят авторы и ранних исследований зимнего кислородного режима водоема [Можайское водохранилище, 1979]. Наблюдения на Можайском водохранилище показывают, что продукционные процессы в самом начале зимы в поверхностных горизонтах преобладают над деструкцией [Пуклаков и др., 2002]: в 1999 г. концентрация растворенного кислорода в фотическом слое увеличивалась со скоростью 0,1–0,2 мг/(л·сут), в 2000 г. – со скоростью 0,3–0,6 мг/(л·сут). В этом же исследовании говорится о том, что одновременно с этим концентрация растворенного кислорода в русловой ложбине резко понижается в результате накопления там обедненных кислородом грунтовых вод: по данным наблюдений в 1999 г. это понижение происходит со скоростью 0,2–0,5 мг/(л·сут), а в 2000 г. со скоростью 0,3–0,5 мг/(л·сут).

В течение зимнего периода содержание кислорода уменьшается по всему водоему, но в поверхностном горизонте центральных и приплотинных районов водохранилищ это снижение незначительно: за период наблюдений на водохранилищах Москворецкой водной системы содержание РК не опускалось ниже 50–60% насыщения. Исключение составляет зимний период 1975/1976 г., когда содержание кислорода в поверхностном горизонте уже в начале зимы было небольшим. Так, на Можайском водохранилище оно составило всего 63–77%, на Рузском – 45–69%, Озернинском – 49–68% и Истринском – 53–76% насыщения. Незначительные в целом запасы кислорода в начале зимнего периода обусловили минимальное содержание его к началу весны: на Можайском водохранилище оно снизилось до 50–53%, на Рузском – до 19–41%, Озернинском – до 30% и Истринском – до 14–31% насыщения.

Более значительно к концу зимнего периода снижается содержание кислорода москворецких водохранилищ в придонном горизонте центральных районов и особенно приплотинных участков (до 3%). Если рассматривать режим вертикального изменения содержания кислорода зимой, то в верхнем десятиметровом слое происходит постепенное снижение концентрации O_2 , ниже располагается слой с резко выраженным уменьшением содержания

кислорода (градиент составляет от 2 до 4 мг/л на метр), еще ниже концентрация вновь уменьшается постепенно и достигает минимальных значений в придонном горизонте. В приплотинных участках к концу зимы формируется 5–7 м слой воды с содержанием кислорода менее 20% насыщения. В зимней водной массе Истринского водохранилища в начале весны 1992 г. было отмечено крайне низкое содержание: 2–9% насыщения [Эдельштейн, Пуклаков, 1996]. По мере удаления от плотины толщина этого слоя уменьшается до 1,5–2,0 м в центральных районах водоемов. Верховья водохранилищ характеризуются значительно бóльшим содержанием кислорода, так как в питании рек в это время начинают участвовать талые воды. После очищения ледяного покрова от снега в водоемах в солнечные дни активизируются процессы фотосинтеза водорослей, в результате чего на глубине 1,5–2,0 м наблюдается некоторое увеличение содержания в воде кислорода.

В последние 10–15 лет в связи с учащением оттепелей в водохранилищах отмечено улучшение кислородных условий в зимний период. По данным съемки 25.03.2012 г. в Можайском водохранилище (рисунок 2.7) минимальное содержание растворенного кислорода составляло не менее 40% насыщения.

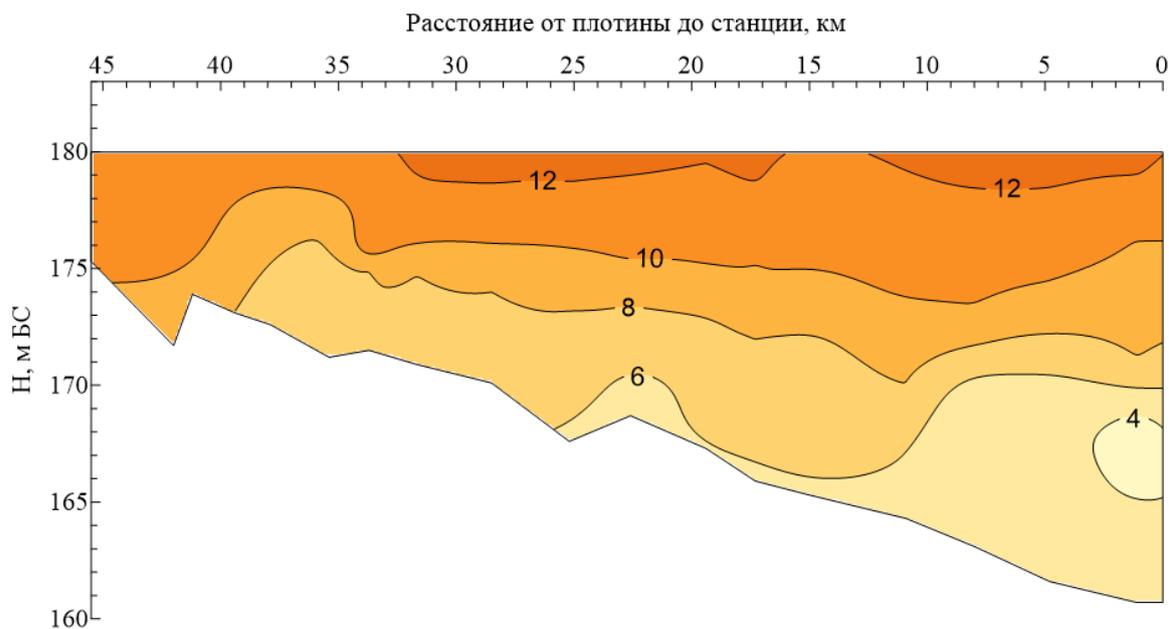


Рисунок 2.7 – Распределение растворенного кислорода в Можайском водохранилище (мг/л) по данным съемки 23.03.2012 г.

2.4. Расчетные характеристики кислородного режима

При всех существующих достоинствах имеющаяся информация о содержании растворенного кислорода обладает некоторыми недостатками. Поскольку содержание РК сильно изменчиво в течение годового цикла, среднегодовое распределение этого показателя обладает крайне низкой информативностью. Большая пространственная неоднородность содержания растворенного кислорода как в продольном, так и в вертикальном разрезе (что особенно актуально для долинных водохранилищ) также затрудняет возможности обобщения массивов данных по его содержанию с целью характеристики состояния всего водоема.

Для обобщения массивов наблюдений и сравнения исследуемых объектов между собой по кислородному режиму проведены расчеты нескольких величин, интегрально характеризующих кислородные условия в водоемах.

С этой целью оценивались объемы зон острой гипоксии, рассчитанные как сумма объемов слоев водохранилища $W_{<2}$, в которых содержание кислорода составляло менее 2 мг/л. Из-за неоднородности содержания кислорода по длине водохранилища расчеты выполнены для нескольких районов водохранилища, в каждом из которых проводились наблюдения на глубоководной русловой станции. Кроме абсолютных значений рассчитывалась доля этой зоны в объеме водохранилища в день съемки.

Также по данным съемок оценены запасы кислорода M_{O_2} , рассчитанные как интеграл произведения концентрации кислорода в каждом слое на объем этого слоя. Средняя концентрация растворенного кислорода \bar{O}_2 , позволяющая исключить влияние колебаний уровня, оценивалась как отношение величины запаса кислорода к объему водоема. Результаты расчетов представлены в приложении А.

Эффективным показателем при характеристике кислородного режима водоемов представляется индекс кислорода (ИК), предложенный в конце 70-х годов Д. Порселлой [Porcella, Petersen, Larsen, 1979]. Индекс рассчитывается

как средневзвешенное по объему абсолютное отклонение содержания растворенного кислорода от концентрации насыщения по уравнению (2.1):

$$\text{ИК} = \frac{\sum_{j=1}^m \frac{\sum_{i=1}^n |O_{2i} - O_2^*| \cdot \Delta V_j}{n}}{V} \quad (2.1)$$

где n – число станций, на которых измерялось вертикальное распределение кислорода; m – число слоев водоема; O_{2i} – концентрация кислорода в слое, мг/л; O_2^* – концентрация насыщения при данной температуре, мг/л; ΔV_j – объем слоя; V – объем водоема.

Таким образом, величина индекса будет увеличиваться как вследствие истощения запасов кислорода, так и при увеличении концентрации в поверхностных слоях вследствие «цветения». Индекс может использоваться как для стратифицированных, так и для нестратифицированных водоемов в период отсутствия ледостава.

Для учета неоднородности кислородных условий в долинных водохранилищах, вызванной их вытянутостью вдоль продольной оси, расчет ИК проводился отдельно для каждого плеса, а величина ИК для водоема определялась как средневзвешенная по объему (по полученным значениям ИК для каждого плеса пропорционально их доле в объеме водохранилища).

Для исследования связи кислородного режима с гидрофизическими показателями были рассчитаны некоторые показатели устойчивости водной толщи:

- устойчивость водной массы по Шмидту S_t , представляющая собой работу, которую необходимо совершить, чтобы полностью перемешать водную толщу, рассчитывается по формуле (2.2):

$$S_t = \frac{1}{F_L} \int (1000 - \rho_z) \cdot (z - z_g) \cdot F(z) dz \quad (2.2)$$

где F_L – площадь водохранилища или его района, ρ_z – плотность воды на глубине z , $F(z)dz$ – объем слоя, z_g – глубина положения инерционного центра, рассчитываемая по уравнению (2.3) как:

$$z_g = \frac{\int_0^{z_m} z \cdot F(z) dz}{F_L} \quad (2.3)$$

Вторая характеристика – озерное число L_N , предложенное гидрофизиками Дж. Имбергером и Дж. Паттерсоном [Imberger, Patterson, 1990], рассчитываемое по уравнению (2.4) как:

$$L_N = \frac{g \cdot S_t \cdot \left(1 - \frac{z_\tau}{z_m}\right)}{\rho_{нов} \cdot u_*^2 \cdot \sqrt{F_L} \cdot \left(1 - \frac{z_g}{z_m}\right)} \quad (2.4)$$

где g – ускорение свободного падения; z_τ – расстояние от дна до термоклина; z_m – максимальная глубина; $\rho_{нов}$ – плотность воды у поверхности; u_* – эффективная скорость ветрового потока с учетом трения о водную поверхность, рассчитываемая по формуле (2.5):

$$u_* = U_{10} \sqrt{C_f} \cdot \frac{\rho_{возд}}{\rho_{нов}} \quad (2.5)$$

где U_{10} – скорость ветра на высоте 10 м; $\rho_{возд}$ – плотность воздуха, C_f – коэффициент ветрового трения.

Устойчивость водной массы S_t и озерное число уже не раз показывали свою эффективность при анализе кислородных условий различных водоемов и даже при их прогнозировании [Hondzo, Stefan, 1996; Imberger, Patterson, 1990; Robertson, Imberger, 1994]. Ниже они использованы при анализе данных учащенных рейдовых наблюдений на Можайском водохранилище.

2.5. Влияние гидрофизических условий на кислородный режим

Кислородный режим рассматриваемых водоемов в значительной степени зависит от характера вертикального перемешивания воды. Особенно четко эта связь прослеживается в летний период при наличии прямой температурной стратификации, когда устойчивость водной толщи к перемешиванию сильнее всего влияет на стратификацию кислорода. При повышении устойчивости и формировании слоя температурного скачка кислород перестает поступать в слои, расположенные ниже термоклина, и в гипolimнионе начинается быстрое снижение содержания кислорода, связанное с его расходом на деструкцию органического вещества и дыхание водных организмов.

Сопоставление показателей устойчивости водной массы, таких как озерное число L_N и стабильность по Шмидту S_t , с индексом кислорода ИК, по данным учащенных рейдовых наблюдений демонстрирует их синхронные изменения, которые происходят в соответствии с синоптической обстановкой.

Так, по данным наблюдений на рейдовой вертикали Можайского водохранилища в 2012 году во второй половине мая отмечен рост устойчивости S_t до значений 110 г/см и синхронный ему рост величины ИК до 3,50. В середине первой декады июня тип погоды сменился на циклонический, что привело к снижению величины устойчивости до 70 г/см, а ИК – до 2,49. Подобные циклы антициклонической и циклонической погоды, продолжительностью до 10–15 дней, сменяли друг друга несколько раз в течение летнего периода, что обусловило пилообразную форму графиков (рисунок 2.8, а). Максимальные значения устойчивости и индекса кислорода относятся к 10 июля: S_t возросла до 235 г/см, ИК – до 4,95, а озерное число – до 86. Постепенное снижение устойчивости и улучшение кислородных условий, отразившееся в уменьшении величины ИК, стало происходить начиная с 16 августа, и уже к концу августа водная толща была практически полностью перемешана и обогащена растворенным кислородом.

В качестве еще одного примера на рисунке 2.8 (б) приведен график для летнего периода 2000 года, аналогичный описанному выше. На нём видно, что отмеченные тенденции сохраняются, и рост величин L_N и S_t , отражающий усиление устойчивости водного столба к перемешиванию, приводит к росту индекса кислорода, происходящему в основном вследствие истощения запасов РК в гипolimнионе. Излишняя резкость линий графиков вызвана недостаточностью частоты наблюдений для адекватного отражения изменений, происходящих в водоеме, однако это самые подробные наблюдения динамики вертикального распределения содержания растворенного кислорода по данным рейдовых наблюдений, проводившиеся на Можайском водохранилище за весь период его существования.

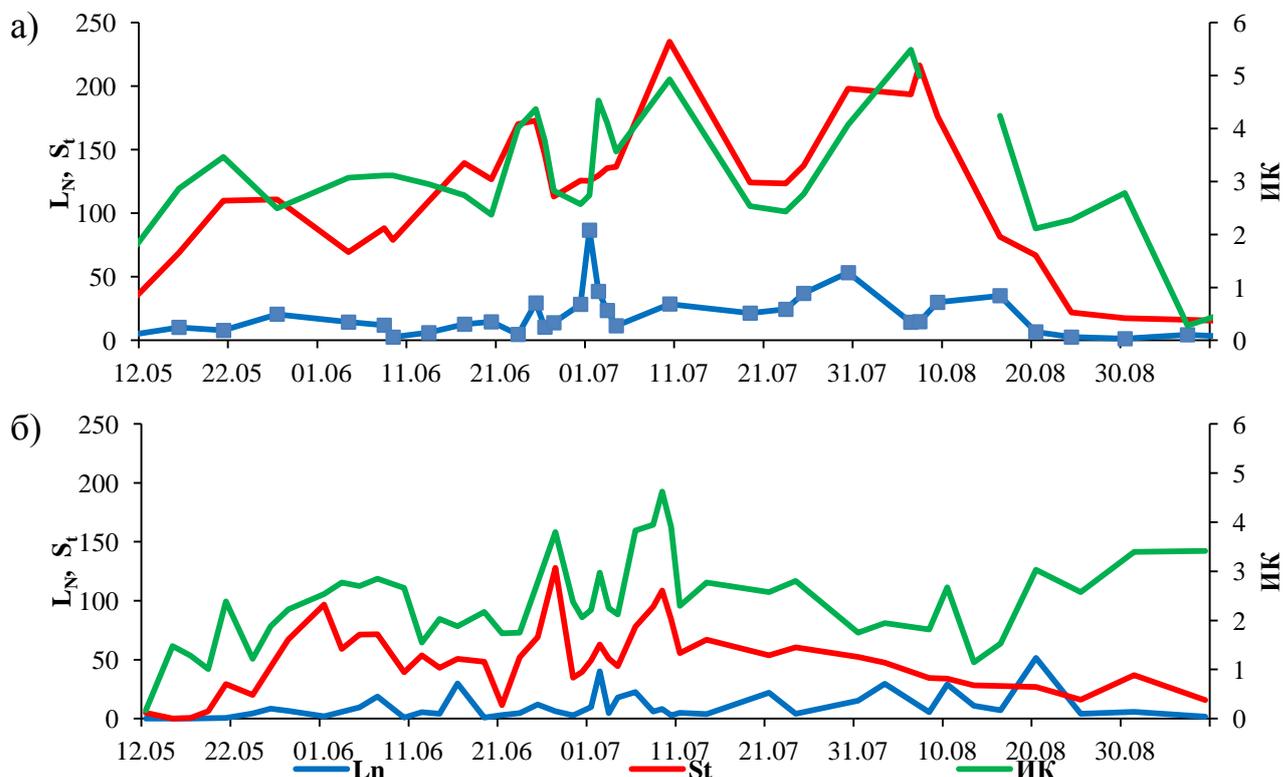


Рисунок 2.8 – Изменчивость устойчивости водной массы (S_t), озерного числа (L_N) и индекса кислорода (ИК), рассчитанных по данным наблюдений на рейдовой станции Можайского водохранилища в 2012 году (а) и в 2000 году (б)

В результате обобщений данных рейдовых наблюдений получены связи индекса кислорода с величиной стабильности водного столба S_t со статистически значимыми коэффициентами корреляции (рисунок 2.9).

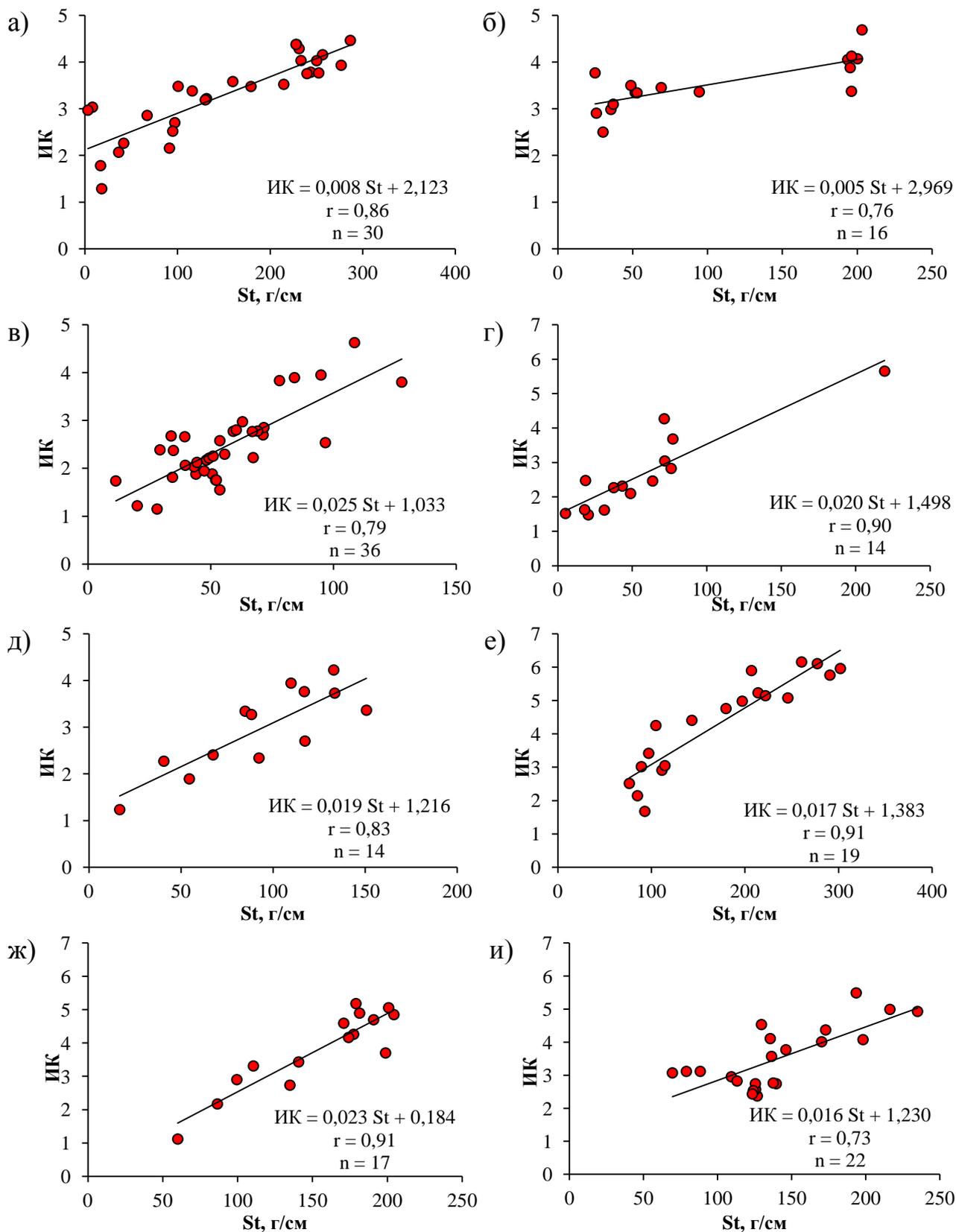


Рисунок 2.9 – Связь устойчивости водной массы (S_t) и индекса кислорода (ИК), рассчитанных по данным наблюдений на рейдовой станции Можайского водохранилища в 1998 (а), 1999 (б), 2000 (в), 2001 (г), 2002 (д), 2010 (е), 2011 (ж) и 2012 (и) годах

Это наглядно подтверждает чувствительность индекса кислорода к изменению гидрофизических условий в водоеме и правомерность использования этой характеристики как результирующей изменения гидрометеорологических условий.

Справедливо и обратное. Расчет изменений показателя вертикальной устойчивости водного столба по Шмидту S_t , или комплексного параметра L_N , позволяет с высокой степенью достоверности судить об изменении кислородных условий в водоеме. Так, например, обнаружена тесная связь между озерным числом и содержанием растворенного кислорода в придонном горизонте (рисунок 2.10), что позволяет судить о содержании кислорода, имея в наличии только данные зондирования температуры и электропроводности, а также информацию о метеорологических характеристиках.

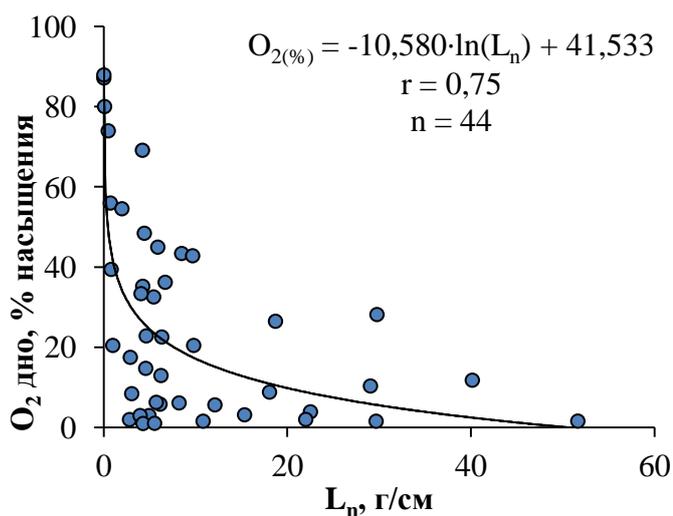


Рисунок 2.10 – Связь озерного числа (L_N) с содержанием кислорода у дна, полученная по данным наблюдений на рейдовой станции Можайского водохранилища в летний период 2000 года

Сопоставление данных наблюдений на рейдовой вертикали с величинами ИК для всего Можайского водохранилища позволяет считать ИК, полученный для Красновидовского плеса, репрезентативным для всего водоема (рисунок 2.11). Однако стоит отметить, что для более подробных исследований внутригодовой изменчивости гидрофизических и кислородных условий в

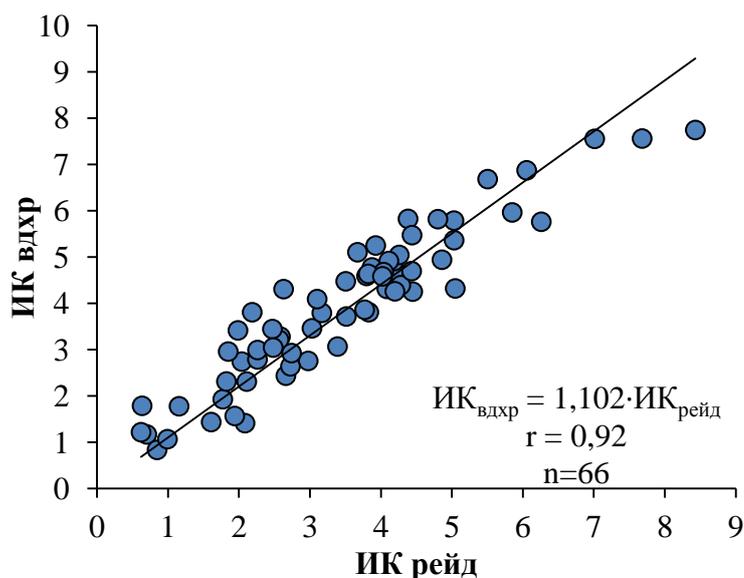


Рисунок 2.11. Связь значений ИК, полученных по результатам наблюдений на рейдовой вертикали Красновидовского плеса, с ИК Можайского водохранилища

долинных водохранилищах (в отличие от озер) необходимо проведение полевых обследований практически ежедневно, так как недостаточная регулярность измерений является основной причиной огрубления полученных связей.

2.6. Развитие бескислородных условий в водохранилищах

Индекс кислорода – показатель, четко отражающий изменения кислородных условий в водохранилищах. Лучше всего это подтверждается при рассмотрении изменения объема гипоксидной водной массы с содержанием растворенного кислорода менее 2 мг/л в период открытой водной поверхности. Этот процесс рассматривается на примере Можайского водохранилища ввиду отсутствия достаточного числа гидролого-гидрохимических съемок других водоемов.

Самая ранняя дата, в которую в 1984 г. зафиксировано наличие гипоксидной водной массы – 28 мая. Тогда она занимала около 1% объема водохранилища, что указывает на недавнее её появление. В дальнейшем

постепенное увеличение этого объема приводит к тому, что к началу июля более 30% объема водохранилища характеризуется низким содержанием кислорода. При этом скорость роста этой зоны может быть очень высокой и достигать 2% в день. Такой интенсивный рост наблюдался в 1999 г. (рисунок 2.12, а) и был связан с интенсивным развитием фитопланктона. На основании этого можно сделать вывод об интенсивном поступлении отмерших клеток фитопланктона в гипolimнион, в результате чего кислород стал быстро расходоваться на окисление автохтонного ОВ.

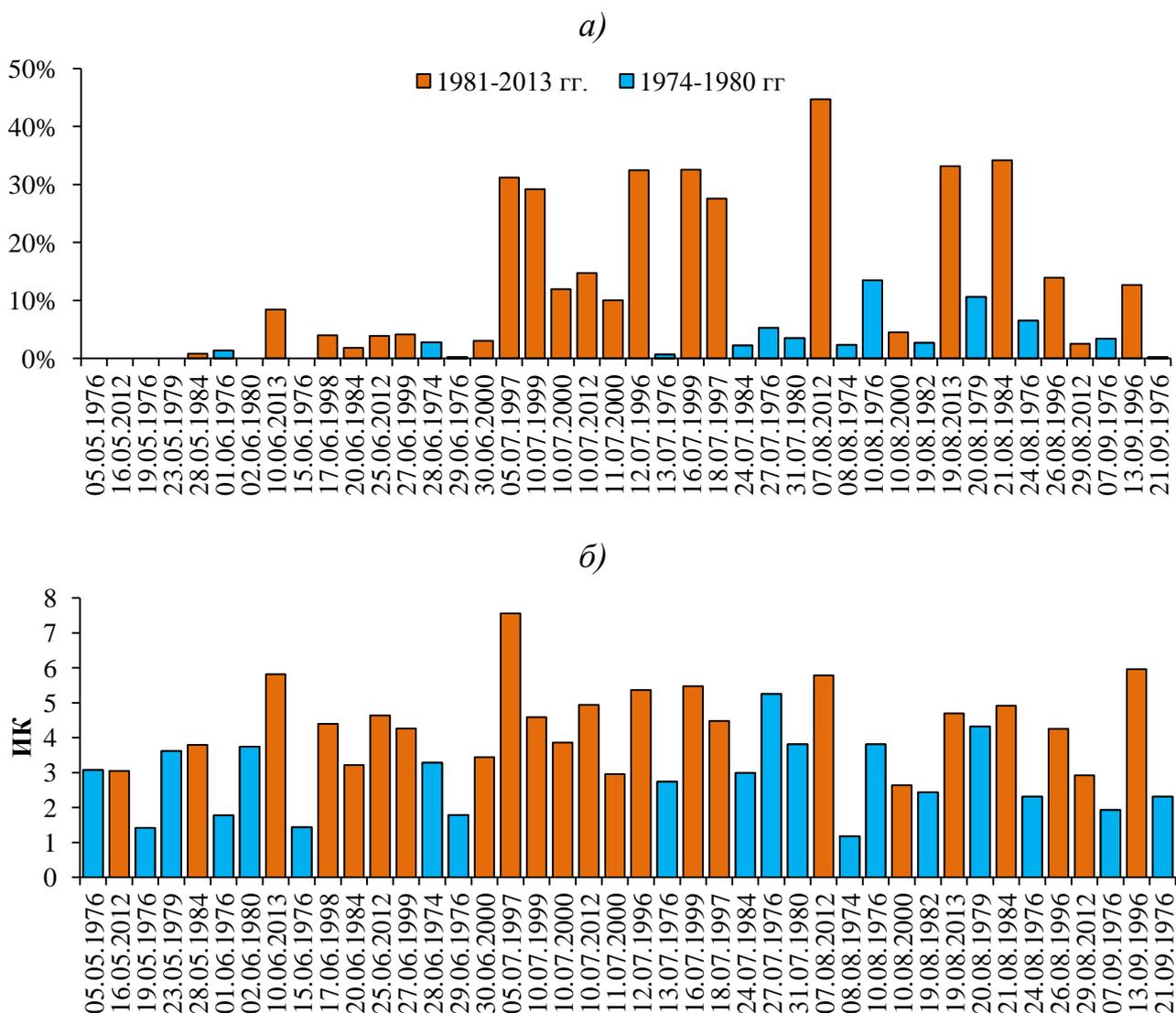


Рисунок 2.12 – Объем гипоксидной зоны с содержанием растворенного кислорода менее 2 мг/л в процентах от объема водохранилища (а) и индекс кислорода (б), рассчитанные по данным гидролого-гидрохимических съемок Можайского водохранилища в летний период

Изменение объема гипоксидной водной массы в течение летнего периода определяется во многом и погодными условиями. Так, при прохождении циклонов, сопровождающихся высокими скоростями ветра, происходит обогащение водной толщи кислородом и уменьшение гипоксидной зоны.

При составлении ранжированного по месяцам ряда с оцененными по данным съемок объемами гипоксидной зоны выделено два периода: с 1974 по 1980 гг. и с 1981 по 2013 гг. На рисунке 2.12 четко видно, что за последние 30 лет в Можайском водохранилище объем гипоксидной водной массы стал заметно больше по сравнению с 70-ми годами. Подобные изменения в кислородном режиме водоема следует связывать как с накоплением в донных отложениях осаждающихся органических веществ, так и с постепенным эвтрофированием водоема. В любом случае можно с уверенностью говорить об ухудшении кислородных условий в гипolimнионе в Можайском водохранилище по сравнению с первыми 20-ю годами его существования.

Изменения величин ИК, рассчитанных по данным съемок (рисунок 2.12, б), повторяют ход изменений объема гипоксидной зоны с некоторыми отклонениями. Расхождения связаны с вкладом в увеличение значений ИК продукции фитопланктона, что не всегда быстро отражается на изменении объема гипоксидной зоны. Так, максимальное значение ИК = 7,56, зафиксированное 05.07.1997, отмечено при существенном, но не максимальном объеме гипоксидной зоны (31% объема водохранилища). По данным этой съемки в это время очень активно вегетировал фитопланктон, в результате чего в поверхностных горизонтах наблюдалась концентрация O_2 19 мг/л, составляющая 190% насыщения. Максимальное из наблюдаемых значение объема гипоксидной зоны составило 45% и было зафиксировано 07.08.2012, однако ввиду отсутствия активной вегетации фитопланктона значение ИК составило в это время 5,79.

Несмотря на небольшой объем имеющихся данных по другим водохранилищам Москворецкой системы, всё же можно сделать определенные выводы. Так, максимальными значениями ИК практически во всех случаях

характеризуется Истринское водохранилище, при этом не всегда выделяясь по объему гипоксидной зоны (рисунок 2.13), что вызвано наиболее активной вегетацией в нём фитопланктона и согласуется с имеющимися в литературе представлениями о соотношении трофического статуса Москворецких водохранилищ [Гончаров, Абдуллаева, 2014].

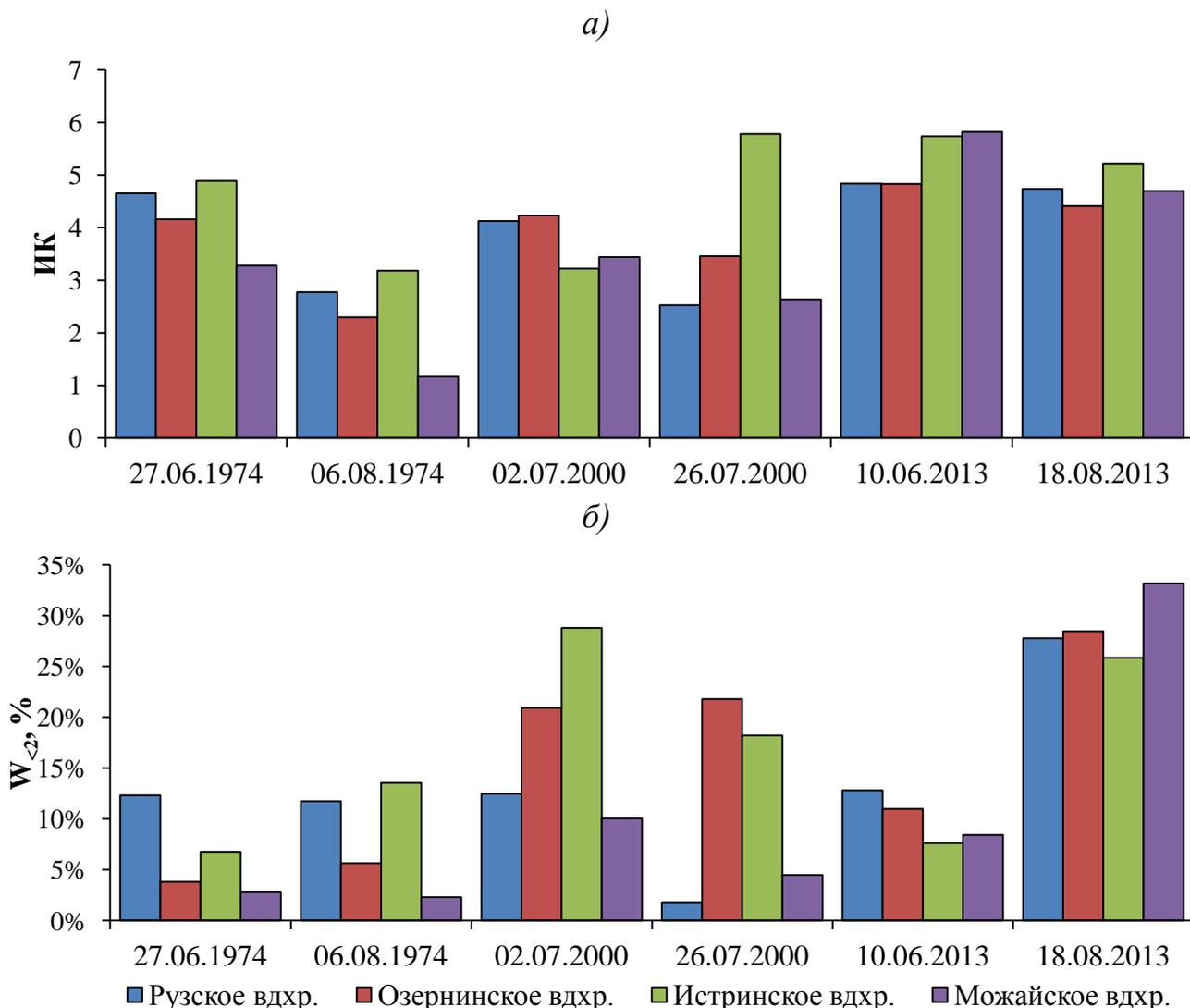


Рисунок 2.13 – Индекс кислорода (а) и объем гипоксидной зоны с содержанием кислорода менее 2 мг/л (б), рассчитанные по данным гидролого-гидрохимических съемок в летний период

При этом Рузское водохранилище, считающееся наименее продуктивным из рассматриваемых, в большинстве случаев характеризуется вторыми по величине после Истринского значениями ИК и часто максимальными объемами гипоксидной зоны. Хотя, как отмечалось выше, в поверхностных горизонтах

максимальные концентрации O_2 в Рузском водохранилище в летний период чаще всего не превышают 110–120%. Можайское водохранилище по сравнению с остальными имеет наименьший объем обедненной кислородом водной массы и минимальные значения величины ИК. Однако, как видно из графиков, представленных на рисунке 2.13, разнообразие связей ИК с гипоксией в водохранилищах Москворецкой водной системы очень велико, что не позволяет на основе этих показателей делать обобщающие выводы об особенностях и различиях кислородного режима водоемов.

В результате анализа данных наблюдений получены тесные связи со статистически значимыми коэффициентами корреляции между значениями ИК и долей гипоксидной водной массы в объеме водохранилищ (рисунок 2.14). Однако следует отметить, что все зависимости получены для безледного

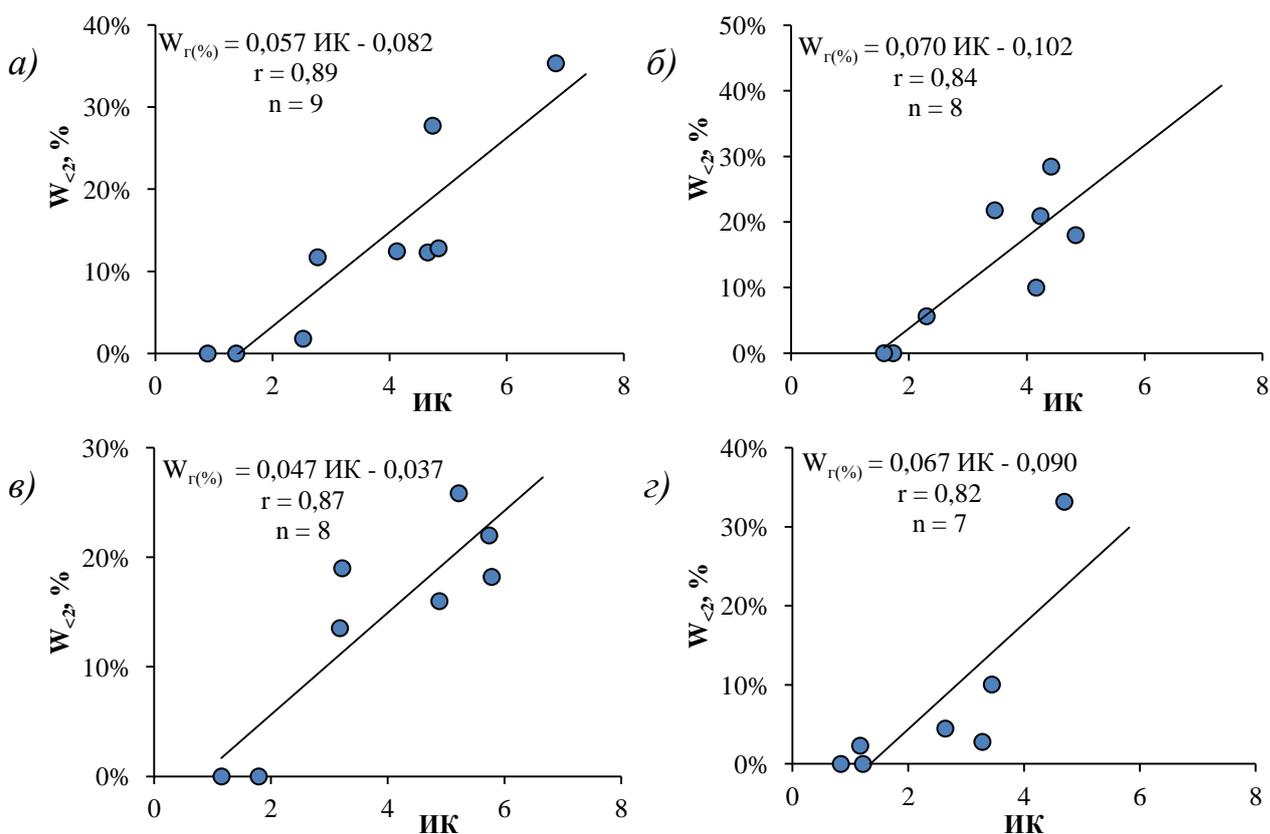


Рисунок 2.14 – Связь объема гипоксидной зоны $W_{<2>}$ (в % объема водохранилища) и индекса кислорода ИК, рассчитанные по данным гидролого-гидрохимических съемок Можайского (а), Рузского (б), Озернинского (в) и Истринского (г) водохранилищ

периода без учета данных съемок, произведенных в период ледостава. В зимний период, когда прекращается поступление кислорода из атмосферы, расчетные значения индекса кислорода достигают 7,3 при том, что водные массы с резким дефицитом кислорода в водоемах отсутствуют.

Помимо использования индекса кислорода для характеристики кислородных условий водоемов, он также может применяться как показатель их трофического статуса. В работе [Даценко, Ветрова, 2006] получена градация кислородного индекса для различных типов трофности водоемов умеренных широт, которая позволяет оценить трофический статус рассматриваемых водных объектов: водоем считается олиготрофным при значении ИК $< 1,3$, мезотрофным при ИК $> 2,1$, а эвтрофным – при ИК $> 3,3$.

Согласно этой градации все четыре исследуемых водохранилища по ИК в летнее время относятся в мезоэвтрофному и эвтрофному типу, а в весенний и осенний периоды их состояние оценивается как олигомезотрофное и мезотрофное, что совпадает с трофическим статусом водоемов, определенным по комплексу гидрохимических и гидробиологических показателей [Даценко, 2007]. В зимний же период, когда расчетные значения ИК достигают чрезвычайно высоких значений по сравнению с другими сезонами, все водоемы следовало бы отнести к эвтрофному типу, что не соответствует действительности, поскольку кислородные условия в период ледостава мало связаны с трофическим статусом водоема. Таким образом, индекс кислорода неприменим для оценки трофического статуса водохранилищ в период ледостава. Данный результат, ранее в литературе не описанный, стал одной из экспериментально полученных границ применения индекса кислорода для комплексной характеристики кислородных условий водохранилищ.

Дополнительной иллюстрацией эффективности применения ИК служит его тесная связь с концентрацией хлорофилла «а» со статистически значимым коэффициентом корреляции, полученная по данным наблюдений на рейдовой вертикали Можайского водохранилища (рисунок 2.15).

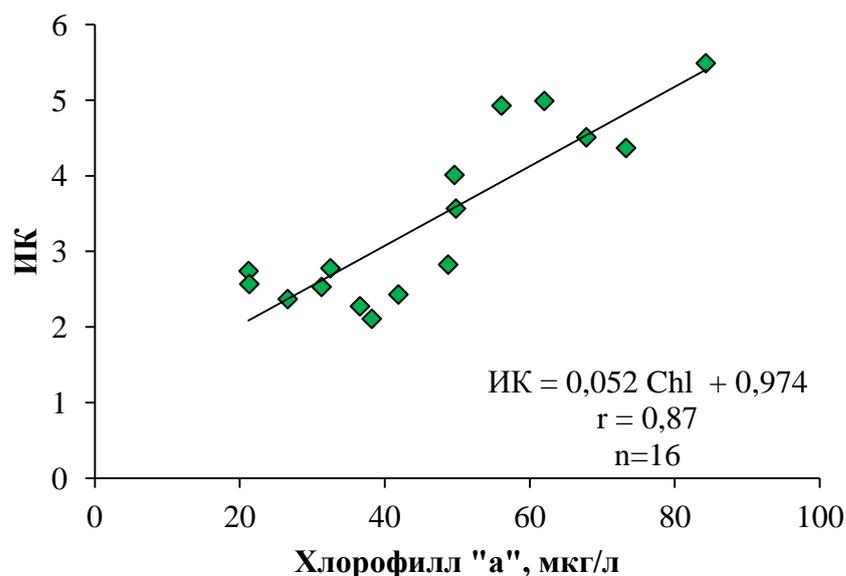


Рисунок 2.15 – Связь содержания хлорофилла а с индексом кислорода (ИК), полученная по данным наблюдений на рейдовой станции Можайского водохранилища в летний период 2012 года

Таким образом, можно считать индекс кислорода удобным показателем для комплексной характеристики кислородного режима водохранилищ, сравнения кислородных условий в нём как в многолетнем, так и внутригодовом разрезе. Также при помощи этого индекса становится возможным определение трофического статуса водоема без проведения полного комплекса гидрохимических и гидробиологических наблюдений, с использованием данных только о вертикальном распределении температуры и содержания растворенного кислорода.

Выводы

Относительная глубоководность и замедленный водообмен москворецких водохранилищ, способствующие развитию в летний период плотностной стратификации водной толщи, обуславливают ежегодное формирование обширной бескислородной зоны в придонных слоях водохранилищ, которая к концу лета может занимать весь гипolimнион.

Показано, что в последние 35 лет в водохранилищах произошло ухудшение кислородных условий в вегетационный период, выразившееся главным образом в увеличении объема гипоксидной водной массы.

Используемые для интегральной оценки кислородного режима водоемов показатели, главным образом индекс кислорода ИК и объем гипоксидной водной массы, тесно связаны с гидрофизическими и продукционными условиями в экосистеме водохранилищ, что определяет значительную внутригодовую и межгодовую изменчивость пространственно-временного распределения РК в водохранилищах.

Оценки трофического статуса водохранилищ на даты гидролого-гидрохимических съемок, полученные по значениям индекса кислорода, хорошо совпадают с подобными оценками по традиционным классификациям и индексам трофического статуса, что позволяет предложить данный показатель для оценки экологического состояния водоемов.

ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ КИСЛОРОДНОГО РЕЖИМА В ДОЛИННЫХ ВОДОХРАНИЛИЩАХ

3.1. Обзор существующих моделей содержания растворенного кислорода в водоемах суши

3.1.1. Основные расчетные схемы

Развитие представлений о процессах, определяющих кислородный режим водоемов, происходило неотъемлемо от изучения процессов самоочищения и формирования качества воды в них, поэтому блок моделирования содержания растворенного кислорода чаще всего является частью комплексной модели пресноводной экосистемы.

Пространственно-временное распределение концентрации растворенного кислорода в водоеме, как и любой экологической переменной, воспроизводится моделированием внутриводоемных процессов массопереноса. В глубоких водоемах важное значение имеет вертикальное распределение РК, характеризующееся максимальными градиентами. Эта задача решается в одномерных гидроэкологических моделях. Для долинных водохранилищ с их характерной продольной неоднородностью гидрологической структуры важны также и горизонтальные градиенты экологических переменных. Двумерные гидродинамические модели позволяют получать подробную картину распределения течений и водных масс либо в плоскости x - y , либо в плоскости x - z . Часть моделей в основе гидродинамического блока содержат численные решения системы уравнений Сен-Венана и являются плановыми. Подобные модели применяются для неглубоких нестратифицированных водоемов. Более эффективны для изучения глубоких озер и водохранилищ двумерные модели, в которых гидрологическая структура воспроизводится в продольно-вертикальном разрезе.

Наиболее полно пространственно-временные поля характеристик в водоемах описываются трехмерными моделями. Часто гидроэкологические модели представляют собой сочетание трехмерного гидродинамического блока и одномерного экологического. Описание закономерностей процесса массопереноса дополняется расчетом изменений концентрации растворенного кислорода внутри водоемов под влиянием химико-биологических процессов, происходящих в экосистеме водоема. В результате на каждом шаге времени получается трехмерное распределение расчетных значений РК в водоеме.

Впервые расчет содержания растворенного кислорода произведен в рамках исследования распространения загрязнения в водном объекте. В системе уравнений, предложенной в середине 20-х годов XX века американскими учеными Стриттером и Фелпсом [Streeter, Phelps, 1925], баланс кислорода в реке определялся двумя процессами: обменом с атмосферой и биохимическим потреблением кислорода бактериями при разложении загрязняющих органических веществ. Реализация этой модели основана на решении линейных дифференциальных уравнений химической кинетики 1-го порядка для каждого из описываемых процессов. Само уравнение Стриттера-Фелпса (3.1) выглядит следующим образом:

$$\frac{dD}{dt} = K_1L - K_2D \quad (3.1)$$

где $\frac{dD}{dt}$ – изменение дефицита кислорода во времени; K_1 – коэффициент, определяющий скорость окисления органических веществ, 1/сут; K_2 – коэффициент, определяющий скорость аэрации, 1/сут; L – концентрация ОВ, D – дефицит кислорода, мг/л.

Решение уравнения Стриттера-Фелпса при условии полного мгновенного перемешивания записывается как (3.2):

$$D_t = \frac{K_1L_0}{K_2 - K_1} (e^{-K_1t} - e^{-K_2t}) + D_0 \cdot e^{-K_2t} \quad (3.2)$$

где D_t – дефицит кислорода в момент времени t ; L_0 – концентрация ОВ в начальный момент времени; D_0 – дефицит кислорода в начальный момент времени.

В дальнейшем система уравнений Стриттера-Фелпса дополнялась учетом процессов нитрификации, потребления кислорода донными отложениями, фотосинтеза и дыхания гидробионтов. Несмотря на то, что данная модель разрабатывалась для водотоков, её принципы взяты за основу и во многих гидроэкологических моделях водоемов.

Современные гидроэкологические модели водоемов строятся на принципе расчета кислородного баланса. В зависимости от количества моделируемых переменных этот баланс может учитывать различные статьи расходования кислорода – окисление органических веществ, окисление соединений железа (II), марганца (II), сульфидов, а в приходной части – аэрацию, фотосинтез фитопланктона, макрофитов, перифитона и др.

Для описания процессов дыхания и окисления чаще всего используются дифференциальные уравнения химической кинетики 1-го порядка. Для перехода от биомассы или концентрации к количеству потраченного на дыхание/окисление кислорода используются стехиометрические коэффициенты. Скорости всех этих процессов зависят от температурных условий, что также необходимо учитывать при моделировании.

Количество кислорода, спродуцированного автотрофными организмами, рассчитывается в зависимости от скорости фотосинтеза и биомассы конкретной группы продуцентов. Скорость роста водных растений рассчитывается чаще всего по уравнениям ферментативной кинетики. Так, удельная скорость роста фитопланктона (зачастую также зоопланктона) в зависимости от концентрации субстрата рассчитывается по функции Моно (трансформированное уравнение Михаэлиса-Ментен) (3.3):

$$\mu = \mu_{max} \cdot \frac{C}{K_c + C} \quad (3.3)$$

где μ_{max} – максимальная удельная скорость роста; K_c – коэффициент полунасыщения, равный концентрации субстрата C , при которой скорость роста будет равна половине от максимальной.

Обычно при моделировании биомассы фитопланктона также накладывается ограничение на функцию роста в зависимости от температуры воды и проникновения света в водную толщу.

Моделирование потребления кислорода грунтами дна (ПКГ) чаще всего производится по уравнению реакции химической кинетики 0-го или 1-го порядка в зависимости только от температуры. Однако, например, для долинных водохранилищ, в которых состав и характер грунтов сильно изменяются от района к району, при расчетах необходимо учитывать и этот фактор.

3.1.2. Существующие гидроэкологические модели, включающие блок расчета содержания растворенного кислорода

В настоящее время имеется множество разнообразных гидроэкологических моделей, в которых производится расчет содержания растворенного кислорода. При этом большинство моделей используют сходные принципы, из которых наиболее широко применяемые описаны выше, и могут отличаться лишь принципами моделирования процессов термогидродинамики.

Трехмерная модель DELFT3D, разработанная в Нидерландах [D-Water Quality, 2014], представляет собой комплекс, позволяющий моделировать режим физических, химических и биологических характеристик одномерных, двухмерных и трехмерных систем (в зависимости от необходимости и возможностей). Гидродинамическая часть модели основана на численном решении уравнения Навье–Стокса для несжимаемой жидкости на мелкой воде в приближении Буссинеска. Для уравнения скорости вертикального движения принимается гидростатическое приближение. Вертикальные компоненты скорости течений рассчитываются через уравнение неразрывности.

Перенос веществ и тепла в 3-D системе координат моделируется при помощи уравнения адвективной диффузии, в которое также включены члены источников и стоков для учета потоков массы и тепла.

В модуле оценки качества воды DELFT3D-WAQ блок расчета содержания растворенного кислорода основан на модели Стриттера-Фелпса. Полное уравнение баланса кислорода учитывает процессы нитрификации и денитрификации, минерализацию взвешенных органических веществ, обмен с атмосферой, потребление кислорода грунтами дна, первичную продукцию фитопланктона. Для оценки затрат кислорода при минерализации ОВ необходимо задать его происхождение: 1) сточные воды; 2) детрит природного происхождения (например, отмершие клетки фитопланктона); 3) смесь из ОВ природного и антропогенного происхождения.

Модель DELFT3D многократно использовалась для прогнозов качества воды (в том числе и растворенного кислорода) в озерах [Kaçikoç, Beyhan, 2014; Jongeling, Zijl, Hulsbergen, 2009] и водохранилищах, в том числе стратифицированных [Preparation of..., 1999; Modelling of the Nam Theun..., 2009; Development of Delft3D-ECO, 2007].

Модель Flake, разработанная коллективом из нескольких российских и европейских институтов, представляет собой одномерный алгоритм расчета термогидродинамического состояния озер, к настоящему моменту опубликованный только для случая наличия ледостава [Golosov et al., 2007]. В этом варианте содержание кислорода определяется вертикальным переносом и потреблением в водной толще и на границе вода – донные отложения. Скорость потребления зависит от температуры воды и концентрации органических веществ, доступных для биохимического окисления. В период без ледостава дополнительно учитываются процессы продукции фитопланктона и обмен с атмосферой.

Наиболее полно описывается баланс кислорода в двухмерной модели SE-QUAL-W2, разработанной специалистами Корпуса военных инженеров и Портлендского университета (США) [Cole, Wells, 2013].

Полное уравнение баланса растворенного кислорода в расчетном отсеке в данной модели включает в себя продукцию и дыхание фитопланктона, эпифитона и макрофитов, обмен с атмосферой, затраты на разложение взвешенного и растворенного органического вещества (отдельно рассматриваются стойкие и лабильные формы ОВ), дыхание зоопланктона, затраты на нитрификацию и потребление кислорода грунтами дна. Необходимо отметить, что предыдущая одномерная версия модели CE-QUAL-R1 учитывала большее число факторов, определяющих кислородный режим водоемов (например, потребление кислорода на окисление железа (II), марганца (II) и сульфидов, а также затраты на дыхание рыб) [CE-QUAL-R1..., 1995], однако в двухмерном варианте они были исключены в связи с незначительностью вклада и трудностями, возникающими при задании входных условий по этим характеристикам.

Модель CE-QUAL-W2 широко используется для моделирования гидроэкологического режима озер и водохранилищ во всём мире уже 20 лет, ежегодно публикуются новые результаты исследований пространственно-временных полей растворенного кислорода с использованием данного инструмента [Ostfeld, Salomons, 2005; Zou et al., 2014; Park et al., 2014; Deus et al., 2013; Kuo et al., 2006; Gunduz, Soyupak, Yurteri, 1998; Filho et al., 1990].

Модель CAEDYM разработана в Центре водных исследований Университета Западной Австралии [Hipsey, Antenucci, Hamilton, 2015]. Она интегрируется с разработанными в этой же организации одномерной гидродинамической моделью DYRESM [Imerito, 2015] и трехмерной гидродинамической моделью ELCOM [Hodges, Dallimore, 2015]. Таким образом, при помощи этого инструмента возможно изучение состояния водной гидроэкосистемы как в одномерном, так и в трехмерном варианте.

В этой модели при расчете содержания растворенного кислорода учитываются обмен с атмосферой, продукция и дыхание фитопланктона, макроводорослей и макрофитов, дыхание зоопланктона, медуз и рыб, затраты кислорода на процессы нитрификации и окисление железа (II), затраты на

минерализацию OB , потребление кислорода грунтами дна. Особенностью алгоритма данной модели является учет биомассы бактерий при расчете затрат кислорода на биохимическое окисление OB , что редко встречается в гидроэкологическом моделировании.

Модели DYRESM-CAEDYM и ELCOM-CAEDYM широко используются при различных гидроэкологических исследованиях [Leon et al., 2006; Trolle, Skovgaard, Jeppesen, 2008; Marcé et al., 2010; Brucea et al., 2006; Kara et al., 2012; Martinsa et al., 2008; Yajima, Choi, 2013], в настоящее время чаще используется одномерный вариант.

Модуль MIKE 21/3–EcoLab разработан в Датском Гидравлическом Институте как одно из дополнений для двухмерной гидродинамической модели MIKE 21 и трехмерной MIKE 3 [Water quality templates..., 2010]. Расчет баланса растворенного кислорода возможен в четырех вариантах, различающихся по количеству учитываемых составляющих. В первом и самом простом варианте учитывается фотосинтез (ограничение роста фитопланктона происходит только по глубине проникновения света), дыхание, биохимическое потребление кислорода, аэрация и потребление кислорода грунтами дна. Во втором варианте рассматривается не суммарное биохимическое потребление кислорода, а определенное и взятое отдельно для взвешенных и растворенных органических веществ. В третьем варианте к перечисленным процессам добавляется учет процесса нитрификации. В четвертом варианте лимитирование развития фитопланктона происходит не только по условиям освещенности, но и по содержанию азота и фосфора. Таким образом, при моделировании кислородного режима водоемов наиболее корректно использовать 4-й расчетный вариант.

Примеров применения моделей MIKE 21 и MIKE 3 для моделирования качества воды в озерах и водохранилищах не так много [Rasmussen et al., 2009; Erichsen et al., 2010; Lake Simcoe..., 2006], однако именно эта модель использовалась для прогноза кислородного режима строящегося

водохранилища крупной гидроэлектростанции Keeyask в нижнем течении реки Нельсон в Канаде [Keeyask generation project..., 2012].

Модель WASP разработана агентством по охране окружающей среды США [Water quality analysis simulation program, 2013]. Этот комплекс позволяет создавать одномерные, двухмерные и трехмерные системы. Расчет растворенного кислорода здесь также возможен по четырем схемам: 1) по модели Стриттера-Фелпса; 2) по модифицированной модели Стриттера-Фелпса, в которой помимо биохимического потребления кислорода и обмена с атмосферой учитываются процессы нитрификации и потребление кислорода грунтами дна; 3) по линейному балансу кислорода, учитывающему фотосинтез и дыхание, нитрификацию, обмен с атмосферой, потребление кислорода грунтами дна, отдельно рассматривается окисление растворенных и взвешенных органических веществ; 4) по балансу кислорода, в котором скорости протекания процессов нитрификации/денитрификации и окисления растворенных ОБ зависят от содержания кислорода в воде и изменяются нелинейно, при этом остальные процессы моделируются также, как и в третьем варианте.

Модель WASP в настоящее время продолжает развиваться и находит свое применение при изучении кислородного режима озер, водохранилищ и морских заливов [Tufford, McKellar, 1999; Zhang, Rao, 2010; Yannopoulos, Kaloyannis, 2008].

Одномерная модель MINLAKE [Riley, Stefan, 1987] разработана в университете Миннесоты. Расчет содержания растворенного кислорода в ней основан на классической модели Стриттера-Фелпса, учитывается только аэрация в верхнем слое и биохимическое потребление кислорода в водной толще. Следует отметить, что растворенный кислород в модели был введен как вспомогательная переменная для расчета биомассы зоопланктона, поэтому для изучения кислородного режима водоемов данная модель интереса не представляет. Однако она нашла свое применение при сравнении кислородных

условий в большом количестве различных водоемов ввиду относительной простоты [Stefan et al., 1996; Fang, Stefan, 2009; Read et al., 2014].

Из отечественных моделей стоит отметить двухслойную модель водной экосистемы, предложенную В.В. Меншуткиным [Меншуткин, 1993; Меншуткин, 2010]. Упрощенная схема представления водоема в виде двух слоев существенно облегчает построение схемы взаимодействий и делает возможным использование данного инструмента для малоизученных либо очень крупных водных объектов.

Содержание кислорода здесь определяется его поступлением при фотосинтезе фитопланктона, затратами на дыхание зоопланктона, водорослей и рыб, бентоса, бактерий, затратами на разложение детрита, вертикальным переносом между эпилимнионом и гиполимнионом, а также обменом с атмосферой. Данная модель многократно применялась для проведения диагностических и прогностических расчетов экосистемы Ладожского озера [Невская губа..., 1997; Моделирование экосистем..., 2003]. Последняя версия представляет собой объединение двухслойной модели экосистемы, разработанной В.В. Меншуткиным и О.Н. Воробьевой [Меншуткин, Воробьева, 1987] с полноценной трехмерной моделью гидротермодинамики Ладожского озера [Астраханцев и др., 1992].

Существенным недостатком этой модели является фиксированное положение слоя скачка во времени и пространстве. Поэтому В.В. Меншуткиным была предложена многослойная модель, по количеству учитываемых процессов аналогичная двухслойной [Меншуткин, 2010].

Большое внимание кислородному режиму уделено в моделях круговорота биогенных веществ (CNPSi-модели) А.В. Леонова [Леонов, Литвинов, Разгулин, 1996; Леонов, Осташенко, Лаптева, 1991]. Им представлена имитационная модель, воспроизводящая трансформацию биогенных элементов и режим растворенного кислорода в двухслойной водной экосистеме и поверхностном слое донных отложений [Леонов, 2008]. В балансе кислорода учитываются продукция кислорода тремя группами фитопланктона и

макрофитами, дыхание водорослей, макрофитов и зоопланктона, затраты на нитрификацию и поступление кислорода при денитрификации, потребление бактериями при окислении ОВ, обмен с атмосферой и дном – всего в модели рассматриваются 24 потока растворенного кислорода.

В мировой литературе представлено еще множество моделей для расчета динамики растворенного кислорода, преимущественно одномерных, разработанных исходя из специфики конкретного водного объекта [Pen et al., 2010; Lindim, 2011; Testa et al., 2014]. К ним относится, например, одномерная модель кислородного режима Телецкого озера, разработанная в лаборатории гидрологии и гидрофизики Института водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН в Барнауле [Зиновьев, 2014].

Специфика водохранилищ, как водных объектов, нечасто рассматривается при моделировании кислородного режима. Кроме семейства моделей CE-QUAL, особенности водохранилищ учитываются в гидрологической модели водохранилища ГМВ-МГУ, разработанной на кафедре гидрологии суши МГУ имени М.В. Ломоносова. В основе блока тепломассообмена лежит балансый принцип, экологическая часть модели построена согласно классическим представлениям о химико-биологических взаимодействиях, распространенным в настоящее время в имитационном экологическом моделировании.

Ввиду того, что модель изначально разрабатывалась для долинных водохранилищ, а её блок тепломассообмена (ТМО) надежно верифицирован для исследуемых объектов [Пуклаков, 1999], она и использована нами в качестве инструмента исследования.

3.2. Гидрологическая модель водохранилища ГМВ-МГУ

3.2.1. Общие сведения

Математическое моделирование гидрологических процессов является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей в гидрологии.

Применение этого инструмента весьма обширно, особенно актуально моделирование при составлении различных прогнозов – от прогнозов характера половодья до прогнозов качества воды.

Очевидно, что для имитации гидрологического режима водотока или водоема необходимо иметь представление о физике и математической формализации всех процессов, так или иначе влияющих на состояние водного объекта и изменение тех или иных его характеристик. Детальность описания всех составляющих в первую очередь зависит от поставленных задач.

Для моделирования кислородного режима водохранилищ Москворецкой водохозяйственной системы в качестве инструмента исследования выбрана квазидвумерная гидрологическая модель водохранилищ ГМВ-МГУ, в основе которой лежит модель теплообмена ТМО [Пуклаков, 1999; Puklakov, 1995], в которой воспроизводится комплекс гидрофизических процессов, происходящих в долинном водохранилище. Второй важной структурной составляющей модели является её экологический блок.

Модель ГМВ-МГУ может быть использована для прогноза водного и теплового балансов, а также для прогноза качества воды на стадиях проектирования и эксплуатации водохранилищ, для оценки эффективности управления режимом работы гидроузла и его влияния на параметры воды в нижнем и верхнем бьефах, для диагностических и прогнозных расчетов гидрологического, теплового и химико-биологического режимов водохранилищ и т.д.

Морфологически простое долинное водохранилище представляется в модели в виде совокупности отсеков, каждый из которых разделен на горизонтальные слои (боксы), внутри которых термическая энергия и вещество распределены однородно (рисунок 3.1). Подобная схематизация позволяет применять к каждому отсеку водохранилища одномерный алгоритм расчета вертикальной структуры.

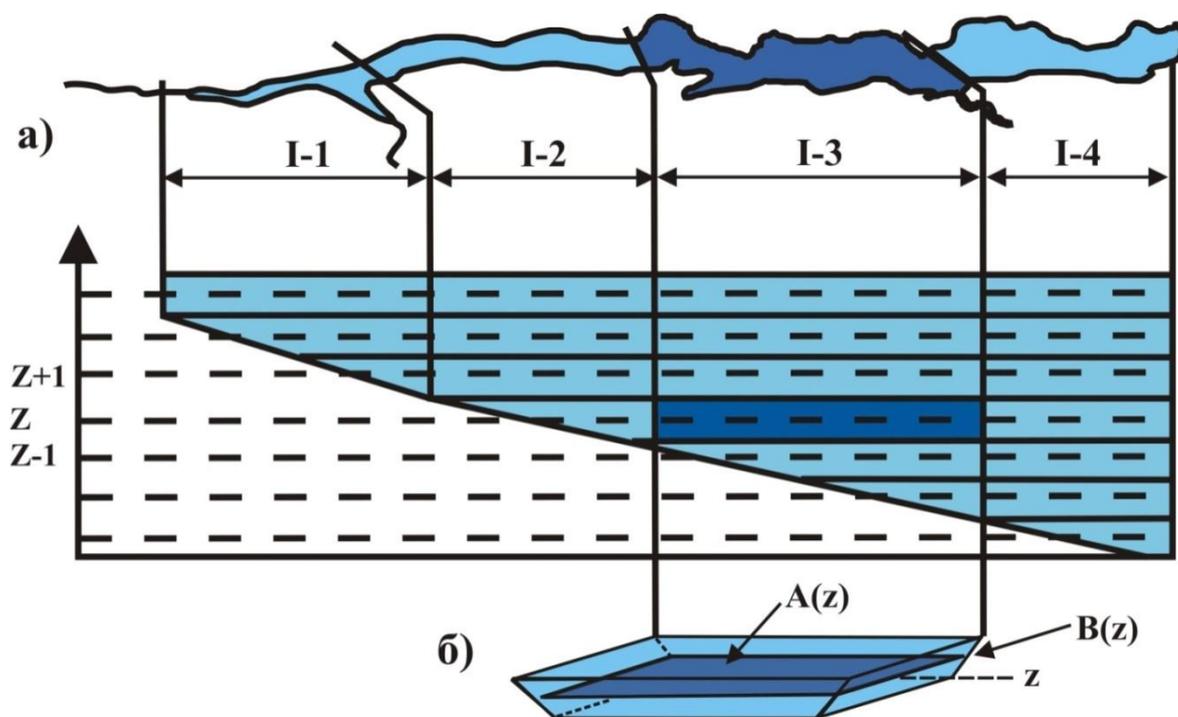


Рисунок 3.1 – Схематизация простого долинного водохранилища: а) деление водохранилища на отсеки; б) продольный разрез и расчетный бокс отсека: $F(z)$ – площадь, $B(z)$ – ширина отсека на горизонте z

Более сложные в морфологическом отношении водоемы представляются в модели как совокупность нескольких лопастей, каждая из которых представляет собой простой долинный водоем. Уровень воды принимается одинаковым для всех лопастей. Лопать на той реке, на которой создано водохранилище, считается главной, остальные – боковыми. Подобная схематизация делает возможным использование модельного алгоритма как для каждой из лопастей, так и для всего водохранилища. Расчет происходит так, что сначала моделируется теплообмен в боковых лопастях, которые представляются как простые долинные водохранилища, последний отсек которых состыковывается с одним из отсеков главной лопасти. Формализация теплообмена между состыкованными отсеками различных лопастей аналогична обмену между соседними отсеками внутри одной лопасти. В дальнейшем при расчете теплообмена между отсеками главной лопасти учитываются обменные процессы её отсеков с боковыми лопастями.

Расчетный шаг модели по времени составляет 1 сутки, а по глубине – 1 метр, за исключением поверхностного слоя, толщина которого может изменяться от 0,5 до 1,5 метров в зависимости от водного баланса расчетного бокса.

Схема процессов, которые учитываются в блоке ТМО, приведена на рисунке 3.2. Внутренний водообмен между смежными отсеками происходит за счет стокового, плотностного, дрейфового и компенсационного переносов. Отток воды в результате стокового течения представляется как её последовательное удаление из всех слоев после того, как определена эпюра скоростей оттока воды из отсека, параметризованная по экспериментальным данным американских гидрофизиков [Chapra, 1997]. Скорость плотностных течений рассчитывается по модифицированной применительно к водохранилищам формуле склонового плотностного потока [Пуклаков, 1999]. Перенос воды на границе между отсеками в результате ветрового воздействия на водную поверхность и эпюра скоростей дрейфового переноса рассчитывается исходя из допущения о ламинарном характере дрейфового течения [Хатчинсон, 1969]. Расход компенсационных течений оценивается исходя из водно-балансовых соотношений.

Внешний водообмен включает в себя приток воды с водосбора, осадки и испарение с водной поверхности, водообмен с береговой зоной водохранилища, сброс воды в нижний бьеф. Сброс воды из водохранилища выполняется согласно диспетчерскому графику открытия водосбросных отверстий. При этом для каждого водосбросного отверстия учитываются условия селективного водозабора при наличии плотностной стратификации приплотинного отсека. Вертикальное перераспределение тепловой энергии и вещества между слоями

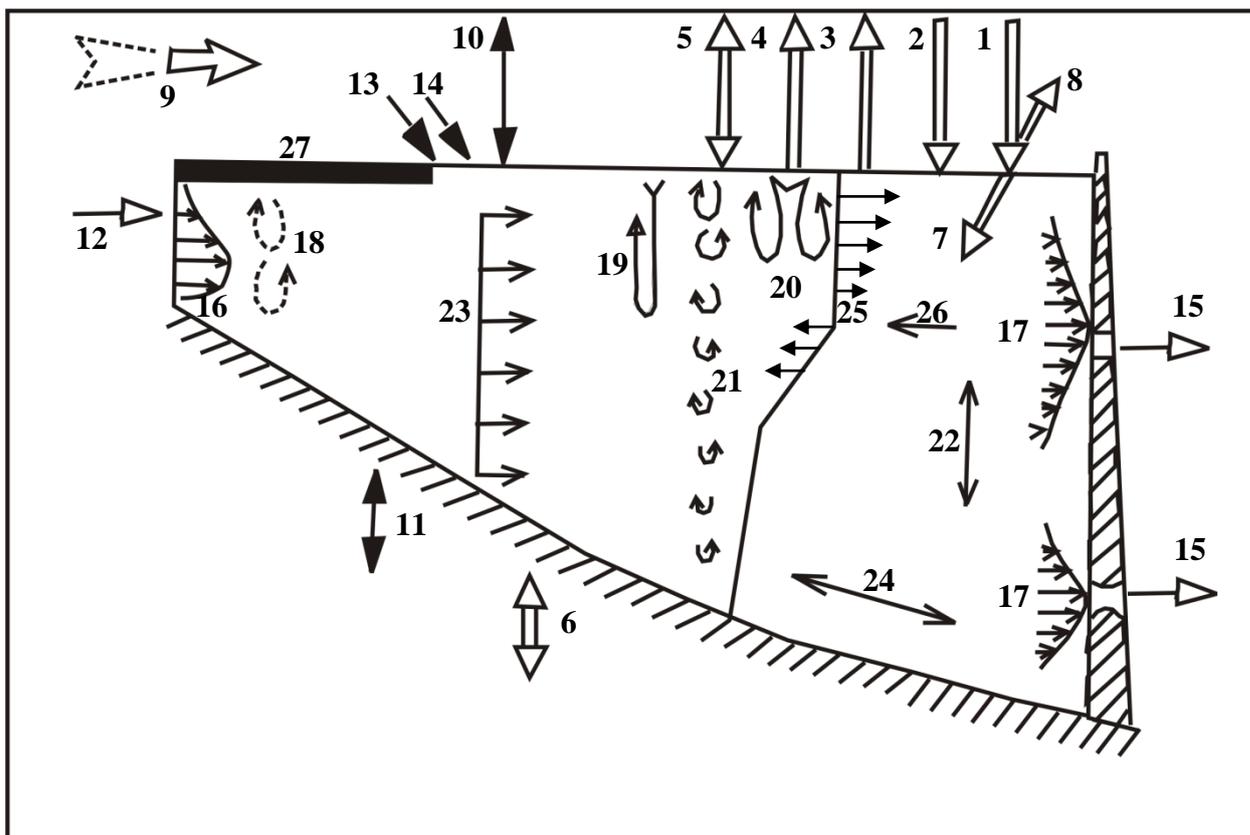


Рисунок 3.2 – Физические процессы, учитываемые в модели ГМВ [26]:

1 – поступление солнечной радиации, 2 – длинноволновое излучение атмосферы, 3 – длинноволновое излучение воды, 4 – потери тепла на испарение, 5 – турбулентный теплообмен с атмосферой, 6 – теплообмен с дном, 7 – поглощение коротковолновой радиации, 8 – отражение солнечной радиации, 9 – трансформация воздушного потока над водоемом, 10 – атмосферные осадки и испарение, 11 – водообмен в береговой зоне, 12 – приток по главной реке, 13 – приток по боковым рекам, 14 – рассредоточенный приток, 15 – сток в нижний бьеф, 16 – плотностное распределение втекающего потока, 17 – селективный водозабор, 18 – динамическое перемешивание в стоковом течении, 19 – свободная конвекция, 20 – вынужденная конвекция, 21 – вертикальный кинетический перенос, 22 – вертикальная адвекция, 23 – стоковый перенос, 24 – плотностные течения, 25 – дрейфовый перенос, 26 – компенсационный перенос, 27 – формирование снежно-ледяного покрова

осуществляется через процессы переноса, которые представлены в модели в виде свободной конвекции, вынужденной конвекции (циркуляция Ленгмюра), водно-балансового переноса и кинетического переноса. Свободная конвекция – это перемешивание воды, вызванное формированием неустойчивого вертикального профиля её плотности. Она рассчитывается исходя из условия сохранения суммарного запаса вещества и энергии неустойчивых слоев после их полного перемешивания. Вынужденная конвекция – это перемешивание воды, вызванное гидростатической неустойчивостью при ветровом воздействии на водную поверхность, при определенных условиях генерирующем систему чередующихся право- и левосторонних вихрей с осями, параллельными направлению ветра. Она рассчитывается исходя из эмпирической зависимости глубины проникновения циркуляции от средней скорости ветра в приводном слое и частоты Вайсяля-Брендта, отражающей плотностную устойчивость верхних слоев отсека [Термодинамические процессы..., 1981]. Водно-балансовый перенос – это процесс вертикального водообмена между слоями в результате изменения запаса воды в них после её горизонтального притока и оттока. Он рассчитывается исходя из условия неразрывности водной среды между слоями. Кинетический перенос – это процесс вертикального переноса воды в результате интегрального воздействия на водную среду различных факторов, вызывающих её неупорядоченные, периодические движения турбулентного характера. Скорость этого переноса на границе раздела между слоями задается эмпирической формулой, отражающей её зависимость от скорости ветра, длины его разгона, глубины, формы ложа отсека и стратификации плотности [Пуклаков, 1999].

Расчет в модели производится в следующей последовательности: сначала считывается исходная информация, включающая морфометрические характеристики отсеков, начальное распределение гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик в отсеках модели водоема, метеоинформация и данные о расходах воды и её химическом составе в притоках водохранилища. Далее производится расчет трансформации

метеозлементов над водной поверхностью, водного баланса водоема и новой среднесуточной отметки уровня воды. После этого рассчитываются изменения показателей качества воды в результате химико-биологических взаимодействий. Потом производится последовательный расчет в блоках вертикального тепломассобмена, внешнего водообмена и внутреннего водообмена. В каждом из них помимо оценки переноса воды и теплоты также рассчитывается и трансформация характеристик качества воды. В конце каждого расчетного шага по времени осуществляется контроль баланса вещества и энергии в каждом отсеке и формирование файлов выдачи результатов расчета вертикального распределения основных характеристик состава воды в каждом отсеке водохранилища, а также воды, сброшенной из него гидроузлом или забранной в каналы или водопроводные станции.

3.2.2. Блок расчета содержания растворенного кислорода

В модели ГМВ расчет величины содержания растворенного кислорода производится в подпрограмме OXYGEN по схеме связей, представленной на рисунке 3.3. При вычислении концентрации РК учитываются следующие процессы:

- поступление и отток растворенного кислорода в результате процессов водообмена;
- поступление и отток кислорода в результате газообмена поверхностного слоя с атмосферой;
- поступление кислорода с выпадающими на водную поверхность осадками;
- продукция кислорода во время фотосинтеза;
- потребление при дыхании фитопланктона;
- потребление в результате процессов нитрификации;
- потребление при разложении детрита;
- потребление при дыхании зоопланктона;

- потребление при дыхании рыб;
- потребление на окисление стойкого и лабильного органического вещества;
- потребление на окисление восстановленных веществ;
- потребление донными отложениями.

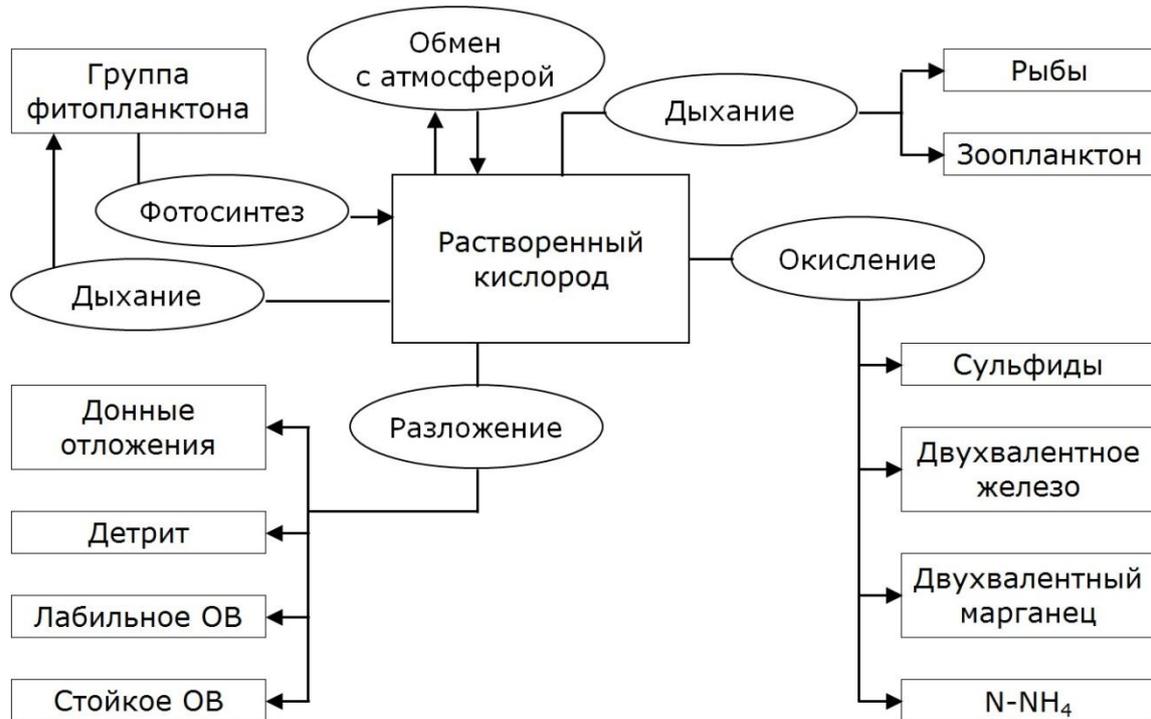


Рисунок 3.3 – Схема связей в кислородном блоке ГМВ

Общее дифференциальное уравнение баланса массы кислорода для расчета величины содержания растворенного кислорода в слое каждого отсека (боксе), в котором учитываются все вышеперечисленные процессы, выглядит следующим образом (3.4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(VC) = & \frac{\partial}{\partial z}(vVC) + \sum Q_{in}C_{in} - \sum Q_{out}C + \sum_{i=1}^3 VP_1\phi_{1i}C_{ai} - \\ & - \sum_{i=1}^3 VP_2\phi_{2i}C_{ai} - VP_3\gamma_1K_dC_m - P_4\gamma_2(VK_cC_d) - VP_2\phi_3C_z - VP_2\phi_4C_f - \\ & - VP_5\gamma_3K_oC_o - VP_5\gamma_3K_rC_r - VP_6C_gK_g - VC_eK_eP_7 - VC_vK_vP_8 + C_x + C_y \end{aligned} \quad (3.4)$$

Рассмотрим все слагаемые, которые входят в него.

Величина $\frac{\partial}{\partial z}(vVC)$ представляет собой изменение содержания РК в результате процесса вертикального перемешивания между слоями. Здесь: v – скорость вертикального переноса, м/с; V – объем слоя, м³; C – содержание растворенного кислорода в слое, мг/л.

Разность $\sum Q_{in}C_{in} - \sum Q_{out}C$ характеризует изменение концентрации РК в слое за счет адвективного притока и оттока. Q_{in} – расход притока воды в слой, м³/с; C_{in} – содержание РК в притоке, мг/л; Q_{out} – расход оттока из слоя, м³/с. Содержание растворенного кислорода во впадающих в водохранилище реках задается в файле с текущими условиями. Удаление растворенного кислорода со всеми видами стока воды рассчитывается для каждого бокса с учетом расходов стока и содержания растворенного кислорода в данном слое в каждый момент времени.

Атмосферная аэрация является процессом, при котором происходит поступление газообразного кислорода в водоемы и его растворение в воде, т.е. представляет собой перенос молекулярного кислорода через поверхность раздела «вода–атмосфера». Растворимость кислорода зависит от температуры воды и атмосферного давления. При каждом сочетании значений этих параметров концентрация насыщения воды растворенным кислородом изменяется.

Следует отметить, что уравнения для определения коэффициента аэрации существенно различаются в зависимости от типа водного объекта. Так, в формулах для рек фигурирует скорость течения и глубина водного потока, тогда как для водоемов основным фактором, определяющим обмен кислородом между водой и атмосферой, является скорость ветра.

В водоемах процесс насыщения воды кислородом можно описать реакцией первого порядка, где основную сложность представляет определение коэффициента аэрации, который трудно поддается измерению в экспериментальных условиях. Многочисленные исследования этого вопроса привели к появлению в специальной литературе большого количества

различных эмпирических зависимостей интенсивности аэрации от скорости ветра и температуры. Обзор и перечень этих эмпирических формул приводится, например, в работе В.Ф. Бреховских [Бреховских, 1988] и в руководстве для пользователей модели CE-QUAL-W2 [Cole, Wells, 2013].

При расчете процесса аэрации поверхностного слоя в модели ГМВ оба этих фактора (скорость ветра и температура) учитываются следующей формулой (3.5):

$$C_y = F_{sur} \cdot K_L \cdot (DO^* - DO) \quad (3.5)$$

где F_{sur} – площадь поверхности, m^2 ; DO – содержание кислорода в поверхностном слое воды, mg/l ; K_L – скорость обмена кислородом воды с атмосферой, которая рассчитывается по эмпирической формуле (3.6) [CE-QUAL-R1..., 1995]:

$$K_L = \frac{86400 \cdot D_0 \cdot \vartheta^{t-20}}{[200 - 60 \sqrt{0,2778 \cdot U_2}] \cdot 10^{-6}} \quad (3.6)$$

где D_0 – коэффициент молекулярной диффузии кислорода, m^2/sec ; U_2 – скорость ветра на высоте 2 м, m/c ; ϑ – параметр температурной коррекции скорости аэрации, t – температура поверхности воды, $^{\circ}C$.

Концентрация насыщения воды кислородом рассчитывается по формуле (3.7) [Унифицированные методы..., 1978]:

$$DO^* = 14,652 - 0,41022 \cdot T_s + 0,007991T_s^2 - 0,0000777774T_s^3 \quad (3.7)$$

где T_s – температура поверхности воды, $^{\circ}C$.

C_x представляет собой поступление растворенного кислорода в поверхностный слой вместе с осадками, выпадающими на водное зеркало водохранилища и рассчитывается по формуле (3.8):

$$C_x = \{14,6 \exp - [(0,027767 - 0,00027T_2 + 0,000002T_2^2)T_2]\} * Q_x \quad (3.8)$$

В этой формуле рассчитывается концентрация кислорода C_x при полном насыщении для температуры осадков с учетом расхода осадков на поверхность водоема Q_x .

Произведение $\sum_{i=1}^3 VP_1\phi_{1i}C_{ai}$ позволяет рассчитать количество кислорода, поступающего в воду при фотосинтезе. В модели ГМВ все водоросли представляются в виде 3 групп: диатомовых, синезеленых и зеленых. В связи с этим расчет скоростей продуцирования и биомассы ведется для них отдельно в подпрограмме РНУТО. Стоит отметить, что это единственная приходная составляющая кислородного баланса, обусловленная внутриводоемными процессами. В этом произведении C_{ai} – биомасса i -ой группы водорослей, мг/л; ϕ_{1i} – скорость фотосинтеза i -ой группы фитопланктона, рассчитываемая для каждого слоя отдельно (1/сут); P_1 – стехиометрический эквивалент для продукции кислорода при фотосинтезе (принят равным 1,4).

Скорость фотосинтеза ϕ_{1i} также рассчитывается в подпрограмме расчета биомассы фитопланктона в зависимости от нескольких факторов, которые определяют развитие водорослей. К ним относятся температура, свет и наличие в воде биогенных элементов.

Потребление растворенного кислорода с дыханием фитопланктона описывается произведением $\sum_{i=1}^3 VP_2\phi_2C_a$, где P_2 – это кислородный коэффициент для биологического дыхания, равный 1,1; ϕ_2 – скорость дыхания i -ой группы водорослей (1/сут), которая рассчитывается в подпрограмме расчета фитопланктона в зависимости от температуры. Биомасса фитопланктона C_a задействована в расчете для учета активной составляющей дыхания, которая отражает возрастание его интенсивности вместе с ростом интенсивности фотосинтеза.

Следующая составляющая, которая учитывается в алгоритме – $VP_3\gamma_1K_dC_m$. Она характеризует потребление РК при нитрификации, в процессе которой в результате окисления аммонийных ионов образуются нитриты NO_2 и нитраты NO_3 . P_3 – это количество г O_2 , необходимое для окисления 1 г NH_4 . Этот параметр принят равным 2,57 г. γ_1 – параметр температурной зависимости процесса нитрификации, K_d – скорость окисления аммиака (1/сут), принятая равной 0,08. C_m – концентрация ионов аммония в слое (мг/л), расчет этой величины ведется в подпрограмме AMMONIA.

$P_4\gamma_2VK_cC_d$ представляет собой потребление РК при разложении детрита в воде. P_4 – стехиометрический эквивалент для разложения детрита и органического вещества донных отложений (1,6), γ_2 – параметр зависимости скорости разложения детрита от температуры, K_c – скорость окисления детрита (1/сут), которая равна 0,009. C_d – концентрация детрита в слое (мг/л), рассчитываемая в подпрограмме DETRITS.

Члены $VP_2\phi_3C_z$ и $VP_2\phi_4C_f$ характеризуют потери кислорода на дыхание зоопланктона и рыб. ϕ_3 – скорость дыхания зоопланктона с учетом температурного фактора (1/сут), C_z – биомасса зоопланктона в слое (мг/л), ϕ_4 – скорость дыхания рыб с учетом температурного фактора (1/сут), C_f – биомасса рыб в слое (мг/л). Коэффициент P_2 , как и для фитопланктона, представляет собой коэффициент дыхания.

Значения $VP_5\gamma_3K_0C_0$ и $VP_5\gamma_3K_rC_r$ учитывают затраты кислорода на окисление лабильного и стойкого органического вещества. P_5 – стехиометрический коэффициент для разложения органического вещества (1,4), γ_3 – параметр температурной зависимости скорости окисления от температуры, K_0 – скорость разложения лабильного органического вещества до минерального (1/сут), C_0 – концентрация лабильного органического вещества в слое (мг/л). K_r – скорость разложения стойкого органического вещества до минерального (1/сут), C_r – концентрация стойкого органического вещества в слое (мг/л). Величины C_0 и C_r рассчитываются в подпрограмме ORGNICS.

Затраты на окисление восстановленных в анаэробных условиях веществ (в алгоритме учитываются Fe^{2+} , Mn^{2+} и S^{2-}) описываются через члены $VP_6C_gK_g$, $VC_eK_eP_7$ и $VC_vK_vP_8$. Здесь C_g – концентрация ионов Mn^{2+} в слое (мг/л); P_6 – количество кислорода, необходимое для окисления 1 г двухвалентного марганца (г) и принятое равным 0,15; K_g – скорость, с которой двухвалентный марганец окисляется в аэробных условиях (0,57 1/сут). C_e – концентрация ионов Fe^{2+} в слое (мг/л); P_7 – количество кислорода, необходимое для окисления 1 г двухвалентного железа (0,14 г); K_e – скорость, с которой двухвалентное железо окисляется в аэробных условиях (1/сут), принята равной 0. C_v – концентрация ионов S^{2-} в слое (мг/л); P_8 – количество кислорода, необходимое для окисления 1 г сульфид-иона (2 г); K_v – скорость, с которой сера окисляется в водной толще (0,3 1/сут). Содержание ионов рассчитывалось в подпрограммах FETWO, MNTWO и STWO соответственно для Fe^{2+} , Mn^{2+} и S^{2-} .

Все перечисленные выше процессы описываются в ГМВ примерно так же, как и в модели CE-QUAL-R1 [CE-QUAL-R1..., 1995].

Параметры температурной зависимости всех вышеописанных процессов аппроксимируются уравнениями вида (3.10):

$$f(T) = \frac{\lg\left(\frac{\alpha_2(1-\alpha_1)}{\alpha_1(1-\alpha_2)}\right)}{T_{\alpha_2} - T_{\alpha_1}} \quad (3.10)$$

где T_{α_1} и T_{α_2} – температуры минимальной и максимальной интенсивности процессов, α_1 и α_2 – температурные множители для температур T_{α_1} и T_{α_2} . Данные параметры отражают замедление процессов (окисления, внутримассовой деструкции, дыхания и т.д.) с понижением температуры.

Описанная многофакторность процессов, связанных с потоками кислорода, демонстрирует большую сложность моделирования содержания растворенного кислорода в водохранилище даже при достаточном количестве

данных наблюдений на водоеме. Помимо фактической информации для расчета необходимо большое количество настроечных коэффициентов, значения которых в различных литературных источниках изменяются в широком диапазоне. При наличии данных фактических наблюдений их значения корректируются в процессе калибровки экологического блока модели.

Помимо этого, моделирование содержания растворенного кислорода требует понимания многих внутриводоемных гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов, которые определяют концентрацию кислорода в каждом боксе в конкретный момент времени. В то же время, биохимические и биологические процессы достаточно сложно поддаются аппроксимации, и чаще всего для их описания используются эмпирические зависимости, полученные для конкретных водоемов, что во многом ограничивает область применения гидроэкологических моделей и является большим препятствием для их широкого использования.

3.3. Подготовка исходной информации для расчетов и верификации

Исходные данные для расчетов по модели разделены на 3 группы:

- файл базовых данных,
- файл начальных условий,
- файл текущей информации.

Файл с базовыми данными включает в себя постоянные параметры водного объекта и его модели, которые не меняются от расчета к расчету. К ним относятся параметры расчетной разностной схемы, количество лопастей и отсеков, морфометрические параметры водоема и его водосборного бассейна, наличие водозаборов и перекачки, а также количество и горизонты расположения осей водосбросов ГЭС, физические и географические параметры бассейна.

Исследуемые водохранилища в модели схематизированы следующим образом: Можайское – в виде 2 лопастей и 19 отсеков, Рузское – в виде 2

лопастей и 5 отсеков, Озернинское – в виде 3 лопастей и 5 отсеков, а Истринское – в виде 5 лопастей, разделенных на 9 отсеков. Схемы водоемов с разделением на лопасти и отсеки приведены на рисунке 3.4.

В этом же файле приводятся все коэффициенты, используемые при расчетах в подпрограммах экологического блока ГМВ. Это параметры, связанные с описанием химических и биологических процессов взаимодействия разных трофических уровней (фитопланктона, зоопланктона и рыб), и переменные, характеризующие химический состав и содержание взвешенных веществ в воде водоема (детрита, минеральных взвесей и седиментов), растворенных в воде минеральных и органических веществ, а также стехиометрические коэффициенты. Полный список коэффициентов, использующихся при расчетах по модели ГМВ, представлен в приложении Б.

В файле с начальными условиями задаются параметры состояния водоема на момент начала расчета. Здесь указывается порядковый номер суток, которые предшествуют первому расчетному дню, с начала календарного года, начальный уровень водохранилища, альбедо водной поверхности, фиксируется отсутствие или наличие ледостава, в случае наличия задается толщина кристаллического и водно-снегового льда, а также высота снега на льду для каждого расчетного отсека. Далее в файле прописываются начальные распределения температуры воды в отсеках, электропроводности и содержания растворенного кислорода, минеральных взвесей, щелочности, рН, биомассы трех групп фитопланктона и зоопланктона, содержания детрита и донных отложений органического происхождения, концентрации ионов NH_4 , NO_3+NO_2 , PO_4 , $\text{P}_{\text{общ}}$, Si, стойкого и лабильного органического вещества, т.е. всех 20 экологических переменных, расчет которых выполняется в модели.

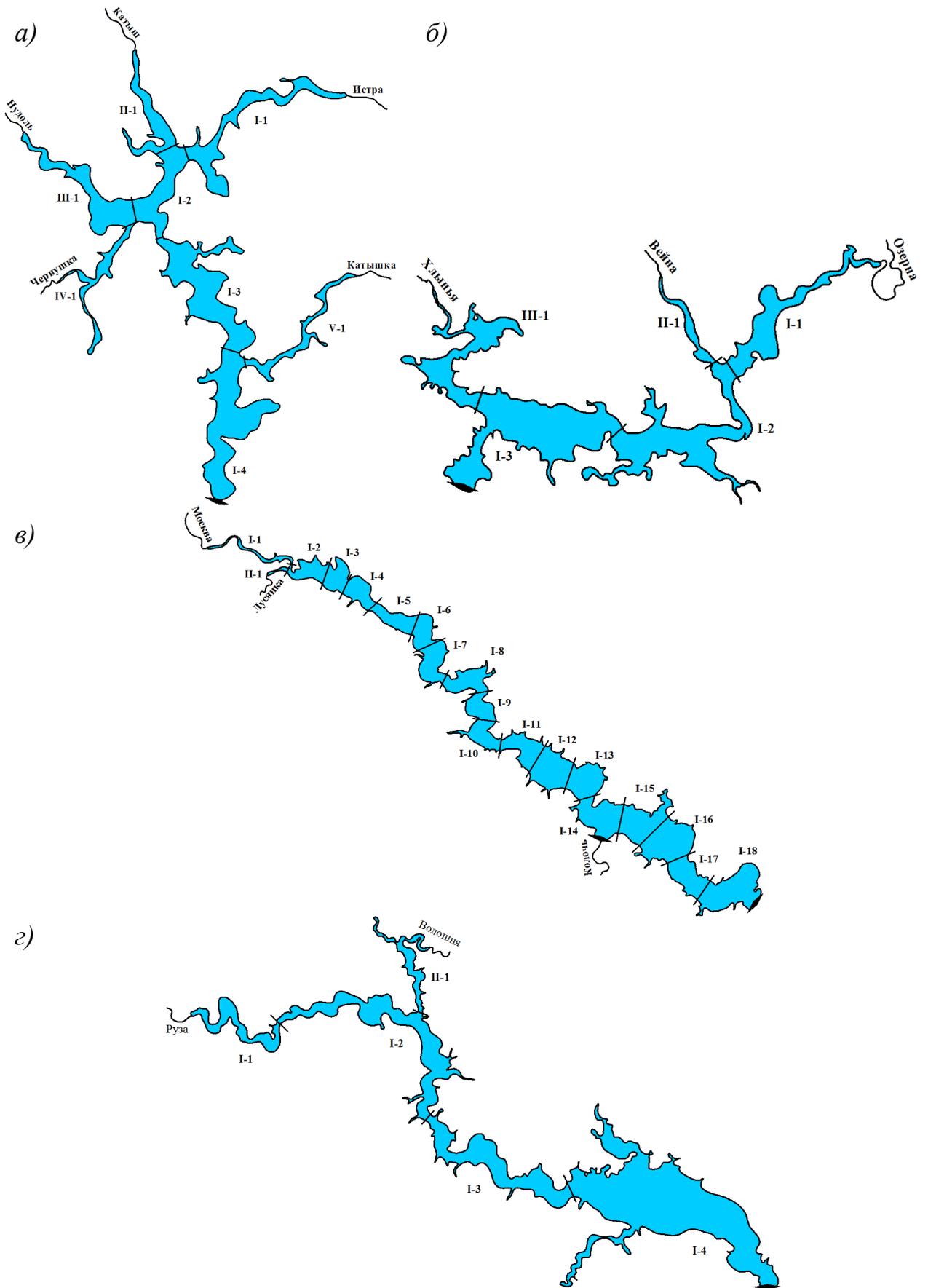


Рисунок 3.4 – Схематизация водохранилищ Москворецкой водной системы, принятая в модели ГМВ-МГУ: а) Истринское, б) Озернинское, в) Можайское, г) Рузское

Помимо начального распределения всех рассчитываемых параметров в файле с начальными условиями прописываются ежесуточные уровни водохранилища за весь расчетный период, в дальнейшем используемые при коррекции водного баланса.

Файл с текущими условиями включает в себя данные, изменяющиеся на каждом временном шаге расчета, т.е. ежесуточные данные: метеоинформацию (температура воздуха, влажность, осадки, средняя скорость ветра и его направление, общая и нижняя облачность, интенсивность солнечной радиации), расходы воды в притоках, перекачку из других гидроузлов, температуру и электропроводность вод всех притоков, расходы сбросов воды в нижний бьеф, а также значения рассчитываемых химико-биологических переменных в водах притоках.

Для задания ежесуточной метеоинформации в файлах текущих условий для исследуемых водохранилищ использованы данные наблюдений на метеостанциях Можайск и Ново-Иерусалим. Данные первой метеостанции показательны для водосборов Можайского, Озернинского и Рузского водохранилищ, а данные второй – для водосбора Истринского водохранилища.

Расходы воды притоков водохранилищ с гидрометрически изученного водосбора, а также сбрасываемой в нижний бьеф получены из баз данных гидрологических наблюдений МГУП «Мосводоканал», содержащих сведения о суммарном притоке и сбросе воды, а также по данным гидрологических ежегодников. Расход воды каждого учтенного притока рассчитывался по формуле (3.11):

$$Q_i = \frac{Q_{\Sigma}}{F_{\text{вдсбр}}} \cdot F_{\text{баср}} \quad (3.11)$$

где Q_{Σ} – незарегулированный суммарный сглаженный приток к водохранилищу, м³/с; $F_{\text{вдсбр}}$ – площадь водосбора водохранилища, км²; $F_{\text{баср}}$ – площадь бассейна реки, км².

На Можайском водосборе при задании притока с гидрометрически изученного водосбора учитывается приток рек Москвы и Лусьянки. Также, в отличие от остальных водохранилищ системы, в Можайское водохранилище осуществляется перекачка воды Колочским гидроузлом, которую необходимо вычитать из суммарного притока перед определением модуля стока.

Для Озернинского водохранилища задается приток по р. Озерна, а приток рек Вейны и Хлыньи рассчитывается в самой модели через модуль стока с помощью реки-аналога (в роли которого выступает р. Озерна).

К водосбору Истринского водохранилища относятся реки: Истра, Катыш, Нудоль, Чернушка и Катышка, гидрометрические посты существуют лишь на первых трех реках, поэтому приток с водосбора р. Чернушки и р. Катышки также рассчитывается в модели.

При моделировании гидроэкологического режима Рузского водохранилища учитывается приток р. Рузы и р. Волошни. С учетом наличия выше по течению р. Рузы плотины Верхне-Рузской ГЭС в файле с текущими условиями задавались сбросы оттуда, а приток с незарегулированной части водосбора р. Рузы рассчитывается в модели с использованием модуля стока р. Волошни в качестве аналога.

Сбросы воды в нижний бьеф на всех четырех гидроузлах осуществляются через поверхностный водослив и турбинный водовод. Их расходы фиксируются гидрологической службой гидроузлов.

Температура воды в реках, в связи с отсутствием данных измерений, принимается одинаковой для всех притоков и рассчитывается по данным о сглаженной методом скользящего среднего температуре воздуха, эмпирически связанной с температурой воды с учетом её тепловой инерции.

Электропроводность воды (S , мкСм/см) притоков Можайского водохранилища рассчитывалась по эмпирическим формулам в зависимости от расхода воды (3.12) – (3.18), полученным по результатам обобщения многолетних данных по наблюдению за расходами и электропроводностью в реках [Водоохранилища Москворецкой..., 1985; Пуклаков, Пуклакова, 2003]:

$$S_{\text{Москва}} = 534,83 \cdot (Q_{\text{Москва}} + 1,7)^{-0,369}, \quad (3.12)$$

$$S_{\text{Лусянка}} = 361,26 \cdot (Q_{\text{Лусянка}} + 0,44)^{-0,374}, \quad (3.13)$$

$$S_{\text{Колоочь}} = 1,0754 \cdot S_{\text{Москва}} + 56,153, \quad (3.14)$$

$$S_{\text{Руза}} = 353 \cdot Q_{\text{Руза}}^{-0,30}, \quad (3.15)$$

$$S_{\text{Озерна}} = 370 \cdot Q_{\text{Озерна}}^{-0,34}, \quad (3.16)$$

$$S_{\text{Катыш}} = 249 \cdot Q_{\text{Катыш}}^{-0,35}, \quad (3.17)$$

$$S_{\text{Нудоль}} = 432 \cdot Q_{\text{Нудоль}}^{-0,47} \quad (3.18)$$

где S_i – значения электропроводности, мкСм/см; Q_i – величины расходов рек, м³/с.

Из характеристик качества воды в притоках в модели ГМВ-МГУ задаются: щелочность; биомасса фитопланктона, где рассматриваются отдельно три группы водорослей: синезеленые, диатомовые и зеленые; концентрация Mn^{2+} , Mn^{4+} ; содержание аммонийного азота (NH_4), а также азота в форме нитратов и нитритов (NO_3^+ и NO_2^+), концентрация Fe^{2+} и Fe^{3+} ; содержание растворенного кислорода, pH, концентрация ортофосфатов (PO_4), серы S_2 , кремния Si , концентрация сульфатов SO_4 , взвеси, детрита, косвенные характеристики содержания органического вещества: перманганатная (ПО) и бихроматная (БО) окисляемости, биомасса зоопланктона и содержание общего фосфора.

Перечисленные выше параметры можно разделить на 3 группы. Первую группу составляют те, данные наблюдений за которыми отсутствуют, но изменения их концентраций связаны почти исключительно с внутриводоемными процессами, в то время как на водосборе и в водах притока их концентрации крайне малы. В связи с этим значения этих характеристик в притоках Можайского водохранилища можно принять равными нулю. Принимаемое допущение не вносит большой погрешности в расчет в связи с тем, что в первую группу входят такие параметры, как биомасса фитопланктона

и зоопланктона, а также содержание детрита, которые имеют преимущественно внутриводоемное происхождение.

Ко второй группе относятся те характеристики, ежесуточные значения которых можно восстановить, используя их связь с измеряемыми параметрами: щелочность, перманганатная и бихроматная окисляемости, минеральные соединения фосфора, концентрация минеральной взвеси.

Значения щелочности (Alk, мг/л), которая зависит от общей минерализации воды, характеристикой которой служит электропроводность, восстанавливались по уравнению их связи. Данная связь хорошо описывается степенной зависимостью; в качестве примера на рисунке 3.5 приведен график такой связи для р. Москвы, коэффициент корреляции составил 0,99.

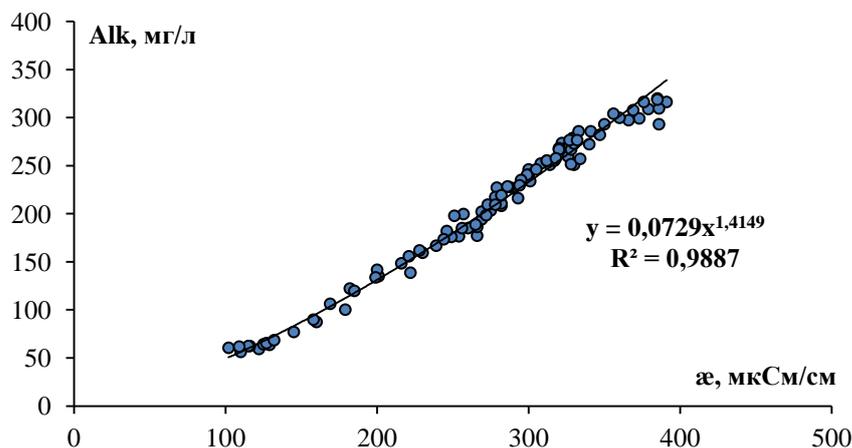


Рисунок 3.5 – График связи между электропроводностью и общей щелочностью для створа р. Москва – д. Барсуки

Наблюдения за содержанием кислорода в равнинных реках, к которым относятся притоки исследуемых водохранилищ, показывают, что полное насыщение воды кислородом наблюдается крайне редко. Обычно вода несколько недонасыщена кислородом, причем величина этого дефицита различается по сезонам года. В нашем случае насыщающая концентрация кислорода в реках корректировалась для каждого месяца. Величины содержания растворенного кислорода за каждые сутки получались путем умножения концентрации 100% насыщения на понижающий коэффициент,

значения которого определялись для каждого месяца отдельно, а затем уточнялись в процессе калибровки модели.

К третьей группе относятся характеристики, не имеющие тесной связи с измеряемыми параметрами, однако в разные фазы гидрологического режима их значения колеблются достаточно сильно. К таким характеристикам относятся соединения азота, рН, содержание кремния, сульфатов и железа, а также взвешенных веществ.

В связи с отсутствием ежедневных наблюдений за вышеперечисленными компонентами химического состава воды, производился сбор всей имеющейся информации, опубликованной в гидрологических ежегодниках и гидрохимических бюллетенях, и её последующее осреднение по фазам водного режима. Полученные в результате среднеголетние значения и принимались в качестве ежесуточных для каждой отдельной фазы.

3.4. Оценка качества модельного расчета содержания растворенного кислорода

3.4.1. Критерии оценки качества результатов моделирования

По мнению президента международного общества экологического моделирования С.Э. Йоргенсена [Йоргенсен, 1985; Jorgensen, Fath, 2011], под верификацией модели понимается «процесс проверки соответствия общего поведения модели целям её создания». То есть, смысл этого этапа моделирования состоит в том, чтобы проверить на качественном уровне, насколько поведение модели соответствует реальным процессам, происходящим в водоеме. После верификации в случае необходимости производится калибровка эмпирических коэффициентов уравнений, входящих в модель, для того, чтобы улучшить сходимость модельных и фактических значений характеристик. В отличие от верификации, валидация – это уже

количественная оценка совпадения результатов моделирования с данными независимых полевых наблюдений.

Для оценки качества воспроизведения моделью ГМВ-МГУ кислородного режима водохранилищ Москворецкой водохозяйственной системы при калибровке и валидации использованы следующие количественные критерии:

- среднеквадратическая ошибка S , оцениваемая по формуле (3.20):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_1^n (O_{2\phi} - O_{2p})^2}{(n-1)}} \quad (3.20)$$

- индекс Тейла, нашедший широкое применение в гидроэкологическом моделировании (3.21):

$$T = \frac{\sqrt{\sum_1^n (O_{2p} - O_{2\phi})^2}}{\sqrt{\sum_1^n O_{2p}^2 + \sum_1^n O_{2\phi}^2}} \quad (3.21)$$

В этих формулах $O_{2\phi}$ и O_{2p} – фактическая и расчетная концентрации растворенного кислорода, n – число членов ряда.

3.4.2. Верификация и калибровка кислородного блока модели ГМВ-МГУ

Подробность верификации в первую очередь определяется полнотой имеющихся в наличии данных наблюдений за состоянием водного объекта. В этом отношении наиболее изученным является Можайское водохранилище. Благодаря многолетним исследованиям, проводимым расположенной на его берегу Красновидовской лабораторией по изучению водохранилищ (ныне Красновидовская учебно-научная база), для данного водоема собран весьма обширный архив материалов наблюдений практически с момента его наполнения. За этот период были осуществлены 2 масштабные программы

наблюдений за режимом водного объекта, во время которых проводилось и изучение кислородного режима водоема: в 1984 и 2012 году. В эти так называемые «балансовые» годы примерно раз в месяц проводили комплексные гидролого-гидрохимические съемки водохранилища по стандартной сетке станций, регулярно отбирали пробы на притоках, питающих водоем. Результаты этих комплексных исследований использованы для подробной верификации кислородного блока модели ГМВ-МГУ.

В гидрологическом эксперименте «Балансовый 1984 год» [Моделирование режима фосфора..., 1995] осуществлялся регулярный отбор проб воды в створах р. Москва – д. Барсуки и р. Лусьянка – д. Черники с максимальной частотой отбора (раз в 1-2 дня) во время половодья и крупных паводков и 1 раз в неделю для летней и зимней межени. На Колочском гидроузле пробы отбирались в дни работы насосной станции. Было проведено 10 гидролого-гидрохимических съемок, во время которых при помощи оксиметра проводились измерения вертикального распределения содержания растворенного кислорода на каждой станции наблюдений.

Расчетный период для верификации составляет 361 сутки, с 28 декабря 1983 г. по 12 декабря 1984 г., число расчетных отсеков – 19. Начальное распределение перечисленных параметров задавалось по данным гидролого-гидрохимической съемки 27 декабря 1983 г.

По данным 2012 балансового года верификация выполнена по результатам наблюдений 8 гидролого-гидрохимических съемок на тех же станциях, что и в 1984 г. Расчетный период составляет 351 сутки, начальное распределение задавалось по данным съемки 28 января 2012 г.

Верификация кислородного блока показала, что модель адекватно воспроизводит внутригодовые изменения содержания кислорода вдоль продольно-вертикальной оси водохранилища. В летний период четко воспроизводится вертикальная структура: в фотическом слое вследствие вегетации фитопланктона отмечается повышенное содержание кислорода. Для развития водорослей в водохранилище характерны два пика: диатомовых в мае

и синезеленых в июле-августе, которые определяют увеличение содержания кислорода до величин 15–16 мг/л. Между этими пиками наблюдается так называемая «фаза чистой воды», когда содержание кислорода в поверхностных слоях снижается до 100–110% насыщения. При этом в гипolimнионе постепенно происходит истощение запасов кислорода, и уже в середине июля обнаруживаются горизонты с полным его отсутствием.

В зимний период результаты моделирования также не противоречат данным наблюдений. Согласно результатам расчета в водохранилище наблюдается постепенное снижение содержания кислорода во всех слоях, обусловленное расходом на деструкцию органических веществ.

В весенний и осенний периоды модель точно воспроизводит интенсивность динамических процессов, которые приводят к выравниванию концентраций растворенного кислорода на уровне, близком к насыщению.

В качестве иллюстрации к сказанному выше на рисунке 3.6 приводятся наблюдаемые и расчетные распределения содержания растворенного кислорода в разные сезоны 2012 года.

При верификации было установлено, что в расходной части баланса кислорода недостаточно полно учитывается процесс потребления кислорода донными отложениями. В связи с этим в подпрограмму OXYGEN была включена еще одна расходная составляющая баланса кислорода, обусловленная внутриводоемными процессами.

Интенсивность потребления растворенного кислорода дном зависит от типа донных отложений, распределение которых определяется морфологическим строением ложа. Для Можайского водохранилища можно выделить три элемента рельефа дна: затопленное речное русло р. Москвы, пойму и надпойменные террасы, для которых существенно различаются скорости потребления растворенного кислорода донными отложениями [Ломова, 1995].

где D_b – потребление РК грунтами дна, $\text{мгO}_2/\text{м}^2\text{сут}$; ε – коэффициент, отражающий снижение величины потока РК в дно склонов речной долины ($\varepsilon = 0,07$) по сравнению с илами русловой ложбины и дном поймы ($\varepsilon = 1,0$), связанное с различием состава донных отложений; $S_{b(20)}$ – интегральное значение потребления кислорода дном при температуре $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$; Θ – эмпирический температурный коэффициент, равный 1,065.

Изначально скорости потребления кислорода донными отложениями были приняты согласно данным многолетних исследований [Ломова, 1995]. Однако редкая сетка станций, охватывающая всего 5 из 19 расчетных отсеков, необходимость интерполяции значений в остальных отсеках и эпизодичность данных наблюдений потребовали проведения их калибровки. Начальные и принятые после калибровки для дальнейших расчетов значения скоростей потребления кислорода донными отложениями при температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$ приводятся в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Способность донных отложений к поглощению растворенного кислорода $S_{b(20)}$, $\text{мгO}_2/\text{м}^2\cdot\text{сут}$ в пределах затопленного русла р. Москвы Можайского водохранилища в различные сезоны года

Сезон года	РО-1	РО-2	РО-3	РО-4	РО-5	РО-6	РО-7	РО-8	РО-9	РО-10	РО-11	РО-12	РО-13	РО-14	РО-15	РО-16	РО-17	РО-18	РО-19
Начальные значения																			
зима	407	464	527	587	500	450	425	400	390	490	370	360	350	400	450	500	550	587	407
весна	379	434	407	407	421	434	434	448	448	490	476	490	518	518	531	545	573	587	365
лето	379	434	407	407	421	434	434	448	448	490	476	490	518	518	531	545	573	587	365
осень	379	434	407	407	421	434	434	448	448	490	476	490	518	518	531	545	573	587	365
Откалиброванные значения																			
зима	781	787	775	734	703	542	465	428	410	410	410	410	410	449	422	437	441	441	751
весна	751	787	775	734	703	542	535	528	517	506	469	431	416	499	382	387	391	391	751
лето	651	687	575	564	553	542	535	528	517	506	469	431	416	499	382	387	391	391	651
осень	651	687	575	564	553	542	535	528	517	506	469	431	416	499	382	387	391	391	651

В процессе работы было выполнено по 3 калибровочных расчета для каждого расчетного периода: без учета потребления растворенного кислорода донными отложениями (КР-1), после добавления в алгоритм расчета этой

величины в подпрограмме OXYGEN (КР-2) и после калибровки скоростей потребления кислорода донными отложениями (КР-3).

Результаты первой серии калибровочных расчетов показали, что среднеквадратическая разница рассчитанных и фактических среднесуточных значений содержания растворенного кислорода в боксах составила в 1984 г. $\pm 2,24$ мг/л (при длине ряда $n = 1876$), а в 2012 г. – $\pm 1,99$ мг/л (при длине ряда $n = 1852$). Величина индекса Тейла по расчетам для 1984 года составила 0,15, а в 2012 г. – 0,14 (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Оценка погрешности смоделированных значений содержания растворенного кислорода в Можайском водохранилище в 1984 и 2012 гг. по результатам двух серий калибровочных расчетов (S – среднеквадратическая ошибка расчета, T – индекс Тейла)

1984 год							2012 год						
Дата	КР-1		КР-2		КР-3		Дата	КР-1		КР-2		КР-3	
	S	T	S	T	S	T		S	T	S	T	S	T
29 января n = 185	1,84	0,11	1,62	0,10	1,38	0,08	24 марта n = 191	1,77	0,11	1,73	0,11	1,66	0,09
27 апреля n = 232	4,16	0,25	3,81	0,24	3,42	0,21	16 мая n = 245	1,73	0,09	1,71	0,09	1,67	0,09
28 мая n = 239	1,87	0,10	1,36	0,10	1,16	0,08	25 июня n = 245	2,20	0,18	2,04	0,17	1,66	0,14
20 июня n = 186	1,79	0,13	1,64	0,13	1,57	0,11	10 июля n = 245	2,23	0,20	2,15	0,20	1,97	0,18
3 июля n = 233	1,84	0,13	1,81	0,13	1,74	0,13	7 августа n = 245	2,28	0,24	2,11	0,23	1,82	0,20
24 июля n = 243	2,36	0,21	2,23	0,20	1,95	0,18	29 августа n = 245	1,46	0,11	1,44	0,11	1,36	0,10
20 августа n = 240	2,58	0,21	2,51	0,21	2,33	0,19	1 ноября n = 227	0,80	0,04	0,74	0,04	0,63	0,03
2 октября n = 234	2,30	0,15	2,28	0,28	2,21	0,14	12 января n = 227	2,84	0,14	2,24	0,12	1,10	0,06
10 ноября n = 105	1,66	0,08	1,66	1,66	1,64	0,07							
В целом за год	2,24	0,16	1,97	0,15	1,58	0,11	В целом за год	1,99	0,12	1,84	0,12	1,57	0,10

Второй калибровочный расчет привел к улучшению качества воспроизведения моделью вертикального распределения растворенного кислорода, однако выявил необходимость калибровки скоростей потребления кислорода грунтами дна. Наиболее существенные улучшения произошли после калибровки величины $S_{b(20)}$: третий калибровочный расчет показал существенное улучшение качества расчетов (среднеквадратическая ошибка уменьшилась в 1984 г. до $\pm 1,58$ мг/л, в 2012 г. – до $\pm 1,57$ мг/л, а индекс Тейла составил 0,11 в 1984 г. и 0,10 в 2012 г).

В таблице 3.2 видно, что улучшение расчета произошло во все сезоны года. Наиболее существенные улучшения расчета отмечены в летний период, когда процессы потребления растворенного кислорода донными отложениями интенсифицируются за счет увеличения температуры воды.

Максимальная погрешность приходится на период половодья (рисунок 3.7), когда в водоеме наиболее интенсивно происходят динамические процессы, в особенности, когда после схода льда увеличивается скорость роста температуры и усиливается конвективное перемешивание, которое в течение нескольких дней охватывает весь водоем. Весной также наблюдаются максимальные ошибки и в расчете температуры и электропроводности.

В вегетационный период это может быть связано с погрешностями расчета биомассы фитопланктона.

При оценке качества моделирования следует учитывать, во-первых, что процессы «цветения» водорослей в водоеме происходят очень неоднородно в пространстве, во-вторых, что данные съемок, по которым проводятся верификация и валидация, представляют собой точечные наблюдения, и, в-третьих, что в результатах расчета для каждого горизонта выдаются характеристики, осредненные по всей площади отсека.

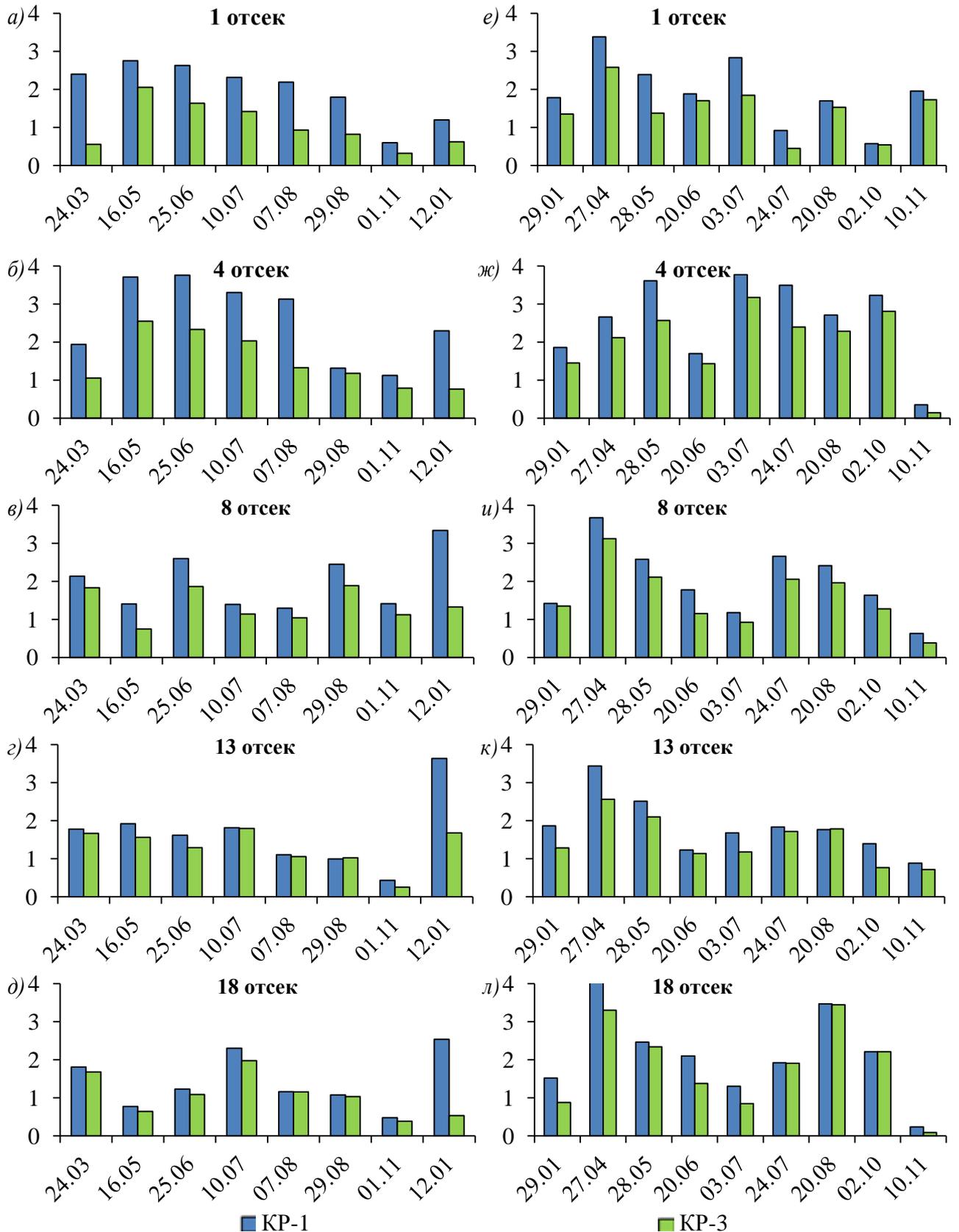


Рисунок 3.7 – Изменение среднеквадратической ошибки смоделированных значений содержания растворенного кислорода (S , мг/л) в Можайском водохранилище в расчетных отсеках по результатам первого (KP-1) и третьего (KP-3) калибровочных расчетов в 2012 (*а, б, в, з, д*) и 1984 (*е, ж, и, к, л*) годах

Качество расчета содержания растворенного кислорода после учета в алгоритме его поглощения грунтами дна улучшилось неодинаково по длине водохранилища. Максимальные улучшения произошли в верховьях водохранилища, где этот процесс происходит наиболее активно, а в центральном и приплотинном участках (рис. 3.7. *г, д, к, л*) улучшения менее выражены.

3.4.3. Валидация кислородного блока модели ГМВ-МГУ

После верификации кислородного блока, включения в алгоритм модели процесса поглощения РК донными отложениями и калибровки производилась её валидация – оценка погрешности расчета с использованием данных наблюдений в годы, различающиеся по водности, метеорологическим условиям и режиму регулирования, при этом не использовавшихся при верификации и калибровке модели.

Валидация кислородного блока модели ГМВ-МГУ производилась для всех четырех водохранилищ Москворецкой водной системы (при этом калибровка модели производилась только для Можайского). В качестве фактических данных использовались результаты 29 съемок Можайского водохранилища и 11 серий съемок Рузского, Озернинского и Истринского водохранилищ в различные сезоны года в период с 1974 по 2013 гг., а также учащенные данные рейдовых наблюдений на Красновидовском плесе Можайского водохранилища за период 1998–2000 гг. и 2010–2011 гг. Использование данных рейдовых наблюдений позволяет оценить качество воспроизведения моделью вертикального распределения содержания кислорода в течение годового цикла.

Выбор этих лет также позволяет оценить чувствительность модели по отношению к качеству входной информации, так как в связи с отсутствием регулярных наблюдений за химико-биологическими параметрами воды

притоков водохранилищ в качестве ежесуточных задавались осредненные по сезонам года значения за весь период наблюдений.

В результате оценки качества расчета по данным учащенных наблюдений на рейдовой станции в центральном районе Можайского водохранилища получено, что средняя квадратическая ошибка расчета содержания РК изменяется в пределах от $\pm 1,90$ до $\pm 2,22$ мг/л при длине ряда n от 286 до 943 (таблица 3.3). При этом в 1998, 2010 и 2011 гг. данными наблюдений охвачен преимущественно вегетационный период, тогда как в 1999 и 2000 годах измерения на водоеме производились в течение всего года.

Таблица 3.3 – Оценка погрешности смоделированных значений содержания растворенного кислорода в Можайском водохранилище в 13 расчетом отсеке по данным рейдовых наблюдений (S – средняя квадратическая ошибка расчета, T – индекс Тейла)

Год	S	T	Длина ряда n
1998	2,18	0,34	412
1999	2,00	0,36	618
2000	2,09	0,33	943
2010	2,22	0,35	306
2011	1,90	0,32	286

Максимальные погрешности возникают весной сразу после схода льда из-за ошибок в расчете даты освобождения водоема ото льда. В летний период в большинстве случаев средняя квадратическая ошибка расчета составляет около 2 мг/л, максимальные погрешности обусловлены ошибками в моделировании температурной эпюры, однако из 5 расчетных лет подобные ситуации возникали только в двух (рисунок 3.8). Необходимо отметить тот важный факт, что качество воспроизведения кислородного режима моделью не ухудшается при возникновении экстремальных ситуаций. Так, в чрезвычайно жаркое лето 2010 г. ошибки расчета содержания растворенного кислорода в водохранилищах не изменились.

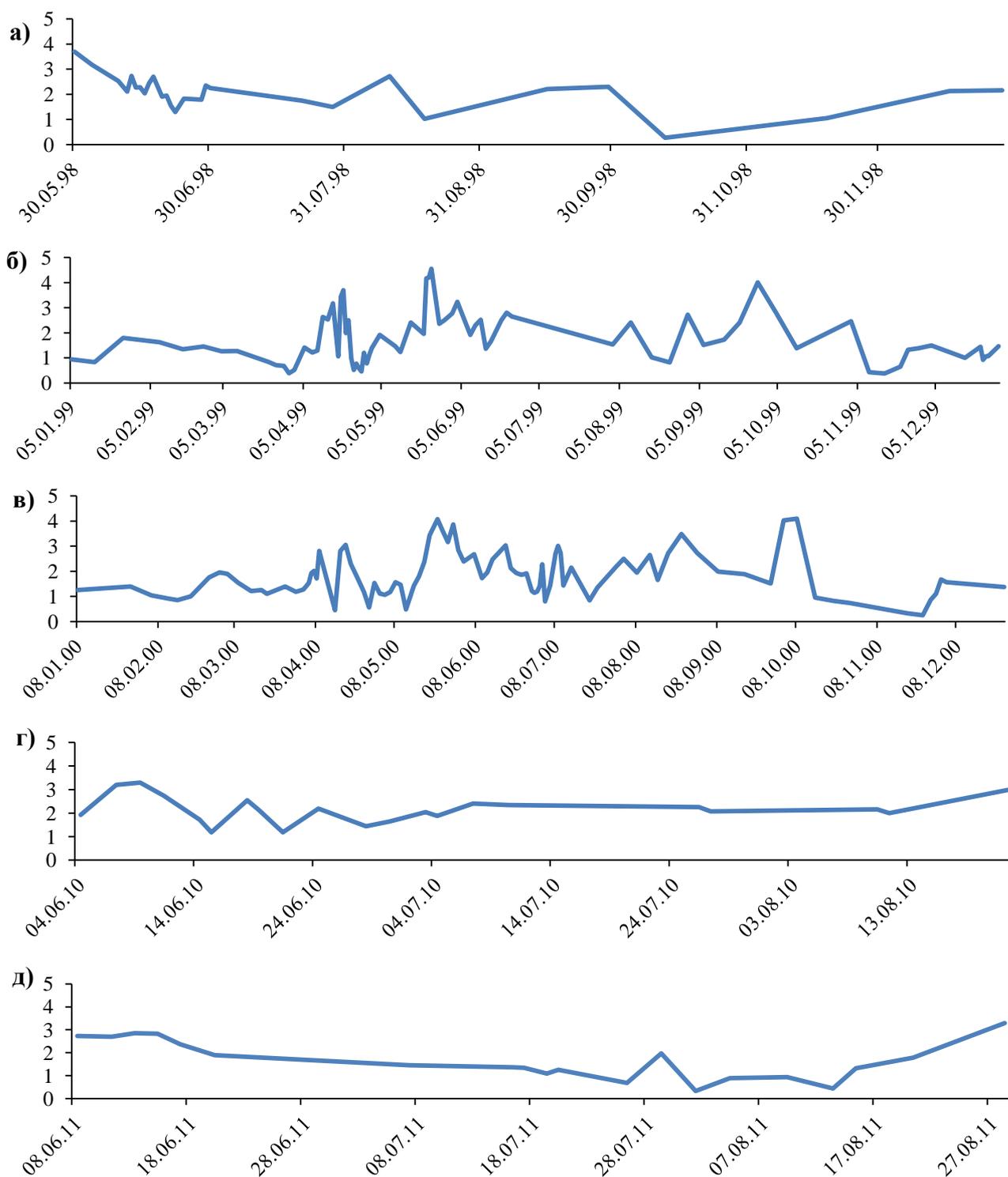


Рисунок 3.8 – Изменение средней квадратической ошибки (S , мг/л) расчета содержания растворенного кислорода в 13 расчетном отсеке Можайского водохранилища в 1998 (а), 1999 (б), 2000 (в), 2010 (г), 2011 (д) годах

Сопоставление расчетных и фактических значений нагляднее всего позволяет оценить степень точности воспроизведения кислородного режима водохранилищ Москворецкой водной системы (рисунок 3.9, рисунок 3.10).

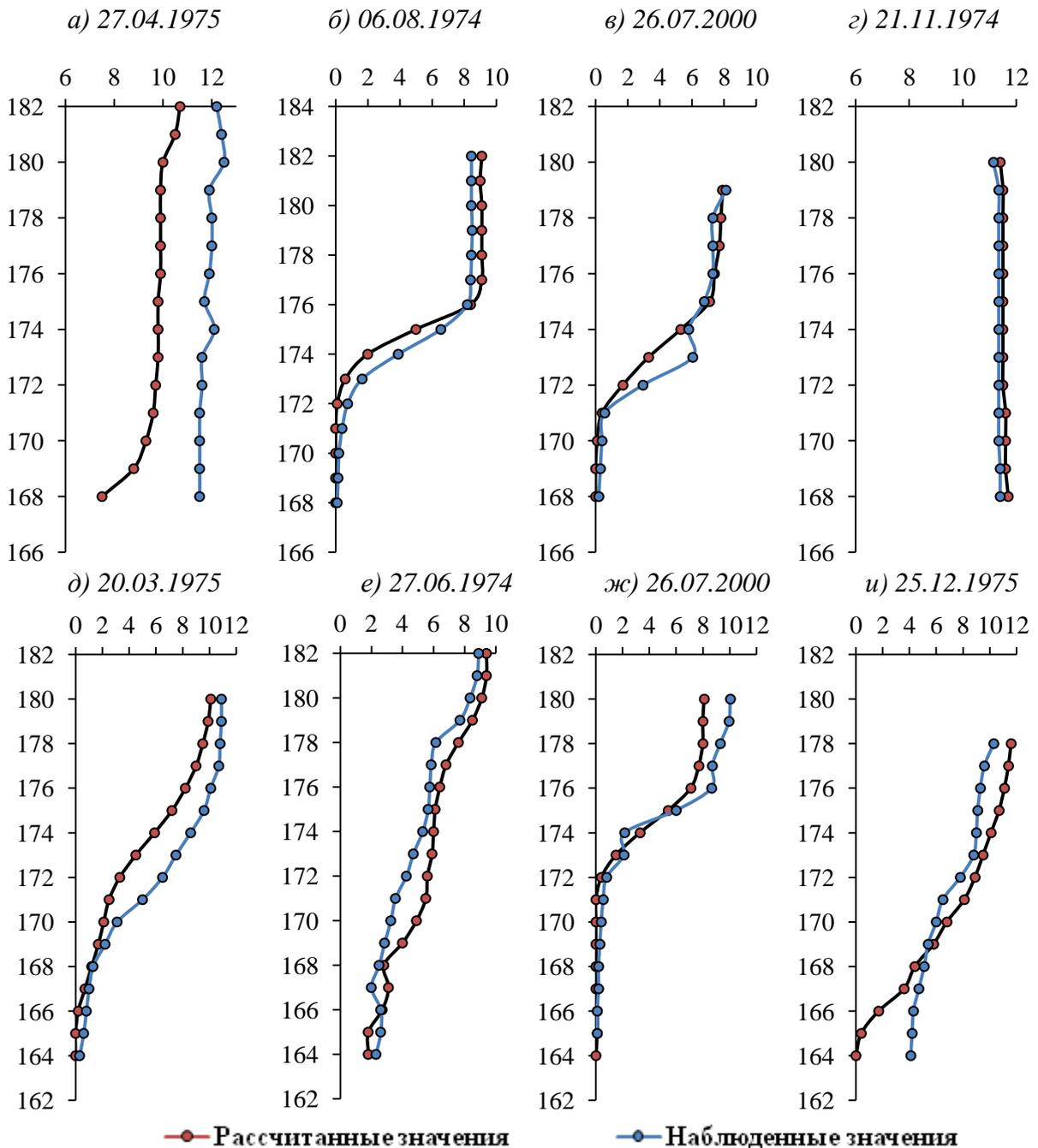


Рисунок 3.9 – Вертикальное распределение растворенного кислорода в центральном районе Рузского (а, б, в, з) и приплотинном районе Озернинского (д, е, ж, и) водохранилищ по результатам расчетов и данных наблюдений (по вертикальной оси – горизонт, м БС)

Из графиков видно, что смоделированные величины достаточно для рыбоводной практики близки к наблюдаемым, вертикальное распределение воспроизводится хорошо в большинстве случаев. Значимость этого факта тем более высока, что калибровка коэффициентов кислородного блока и настройка

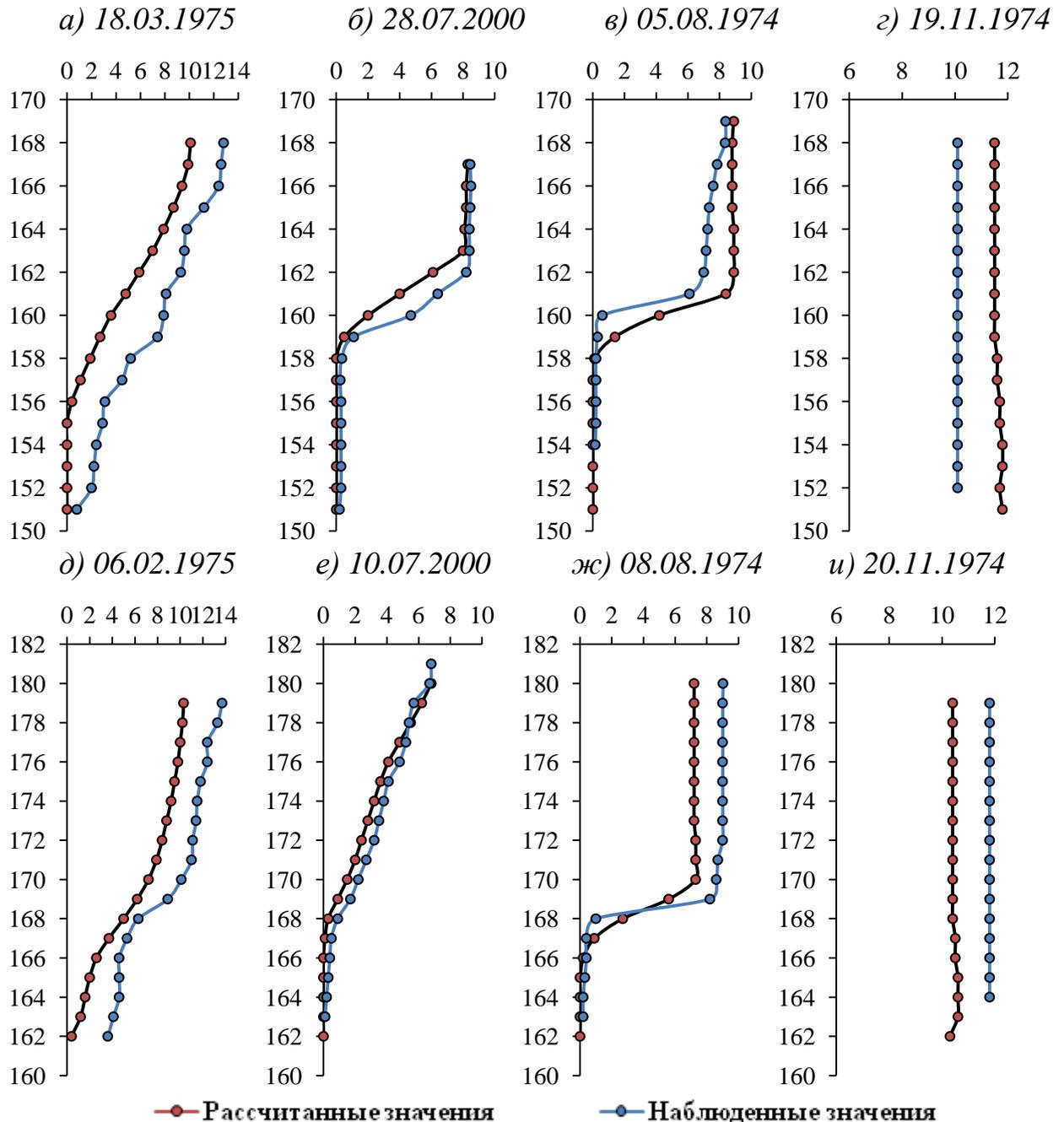


Рисунок 3.10 – Вертикальное распределение растворенного кислорода в приплотинных районах Истринского (а, б, в, г) и Можайского (д, е, ж, и) водохранилищ по результатам расчетов и данных наблюдений (по вертикальной оси – горизонт, м БС)

остальных блоков модели для Рузского, Озернинского и Истринского водохранилищ не производилась. Значения рассчитанных статистик (приложение В, рисунок 3.11) и сопоставление вертикальных профилей свидетельствуют об одинаковой адекватности расчета моделью содержания кислорода во всех водоемах.

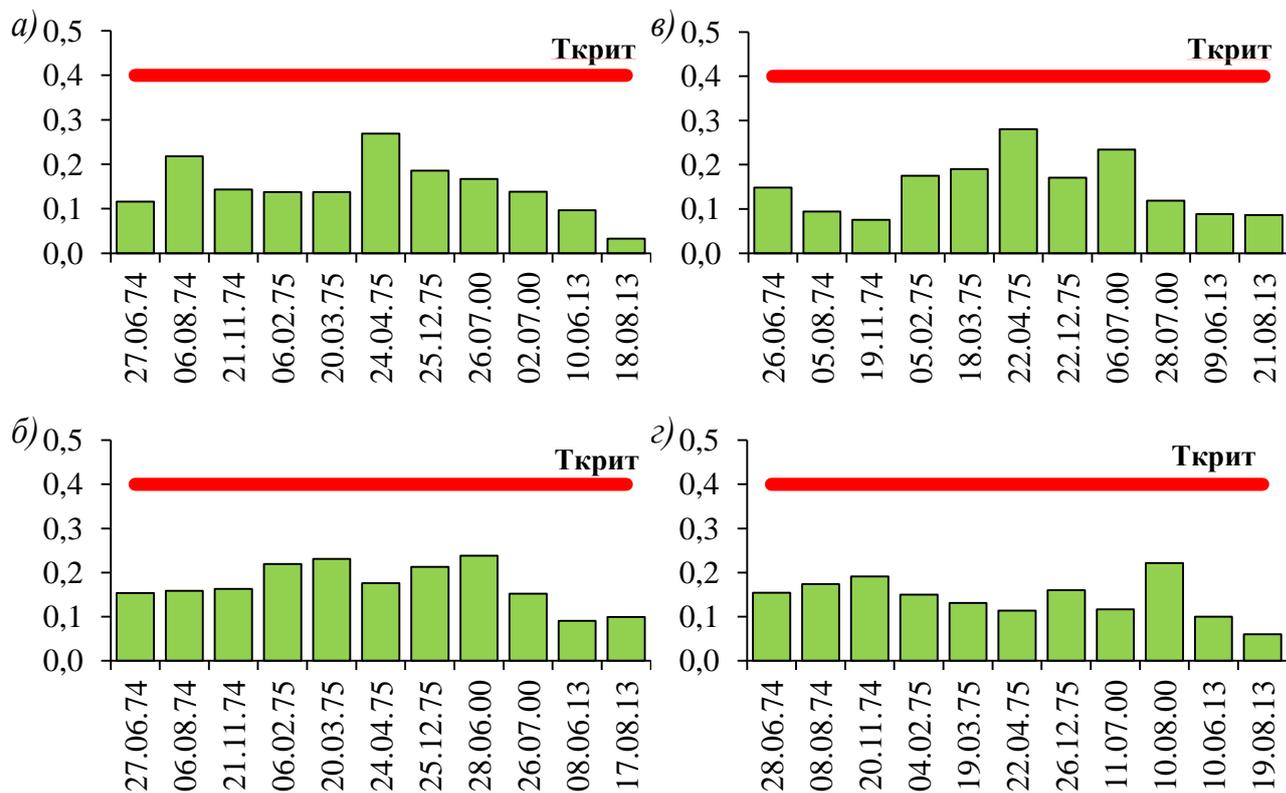


Рисунок 3.11 – Значения индекса Тейла, характеризующие точность расчетов содержания растворенного кислорода в Озернинском (а), Рузском (б), Истринском (в) и Можайском (г) водохранилищах по данным 11 съемок

Произведенные верификационные расчеты и последующая валидация модели ГМВ демонстрируют высокое качество моделирования кислородного режима водохранилищ Москворецкой водной системы и позволяют использовать её как инструмент исследования. Стоит отметить малую зависимость качества расчета от задаваемого содержания компонентов химического состава воды в притоках. Это объясняется тем, что внутриводоемные процессы оказывают определяющее влияние на изменение

содержания растворенного кислорода в водохранилище в сравнении с притоком воды в малопроточные водохранилища.

Выводы

Математические модели, воспроизводящие пространственно-временные изменения растворенного кислорода в водоемах, основаны на построении уравнения баланса кислорода с учетом динамических и экологических процессов в экосистеме. Наиболее полно учитывают специфику этих процессов модели семейства CE-QUAL, а также квазидвумерная боксовая модель ГМВ-МГУ, адаптированная в том числе и к водохранилищам Москворецкой системы.

Верификация кислородного блока ГМВ-МГУ по данным гидролого-гидрохимических съемок Можайского водохранилища показала адекватность воспроизведения кислородного режима водоема.

Калибровочными расчетами установлены оптимальные значения скоростей потребления РК донными отложениями в водохранилищах Москворецкой системы водоснабжения, которые позволили существенно улучшить качество воспроизведения моделью вертикального распределения кислорода.

Полученные значения средней квадратической ошибки модельного расчета и широко применяемого в гидроэкологическом моделировании индекса Тейла свидетельствуют о высоком качестве воспроизведения моделью ГМВ-МГУ режима растворенного кислорода во всех водоемах.

ГЛАВА 4. МОДЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ НА КИСЛОРОДНЫЙ БАЛАНС И РЕЖИМ МОСКВОРЕЦКИХ ВОДОХРАНИЛИЩ

4.1. Оценка составляющих кислородного баланса в водохранилищах

4.1.1. Обоснование модельных расчетов кислородного баланса

Составление кислородного баланса водоемов – задача, которую невозможно решить экспериментальными методами ввиду чрезвычайно сложной структуры его приходных и расходных составляющих. Немногие опубликованные оценки представляются для зимнего периода [Оксиюк и др., 2001; Пуклаков и др., 2002], когда число составляющих баланса резко сокращается. Затраты кислорода чаще всего оцениваются интегрально как величина общей деструкции, так как оценить вклад каждого процесса возможно лишь в рамках лабораторных экспериментов, а путем проведения полевых обследований – просто невозможно.

Имитационная модель гидроэкологического состояния водохранилища позволяет рассмотреть баланс кислорода самым детальным образом как для водохранилища в целом, так и для отдельных его районов. Появляется возможность количественно оценивать роль отдельных видов течений в переносе кислорода внутри водохранилища, что ранее обосновывалось лишь гипотетически [Пуклаков, 1999; Пуклаков, Эдельшетйн, 2001]. Кислородный обмен внутри водоема очень важен в периоды стратификации, так как он является ключевым фактором в предотвращении истощения запасов кислорода в центральном и нижнем районах.

Для водохранилищ Москворецкой водохозяйственной системы баланс кислорода рассматривается отдельно для летнего и зимнего периодов. В качестве расчетных лет выбраны те же годы, которые использовались для валидации кислородного блока. Диагностическим расчетом режима РК по

данным этих лет показана адекватность воспроизведения кислородного режима. Дополнительным подтверждением этой адекватности служат результаты верификации расчета других неконсервативных показателей качества воды, режим которых непосредственно связан с режимом растворенного кислорода [Даценко, Ерина, Пуклаков, 2015; Эдельштейн и др., 2012; Даценко, Ерина, Пуклаков, 2012; Даценко и др., 2012]. Кроме того, по данным гидролого-гидрохимических съемок и результатам моделирования выполнен расчет запасов кислорода в водной толще водохранилищ. Связь полученных величин (рисунок 4.1) характеризуется статистически значимыми коэффициентами корреляции ($r > r_{0,01}$).

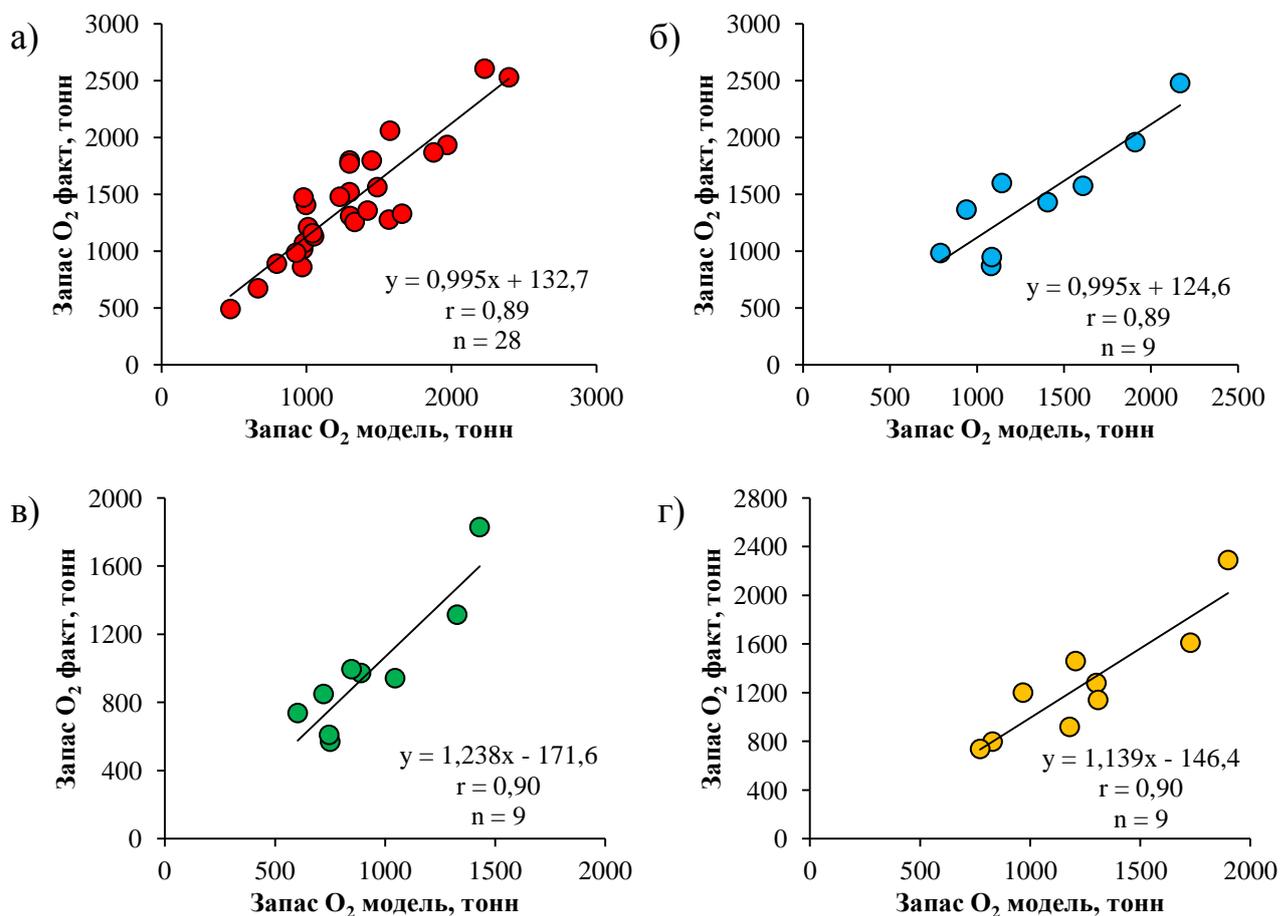


Рисунок 4.1 – Соотношение запасов кислорода в Можайском (а), Рузском (б), Озернинском (в) и Истринском (г) водохранилищах, рассчитанных по данным наблюдений (запас O_2 факт) и результатам моделирования (запас O_2 модель)

Для изучения пространственной неоднородности протекания внутриводоемных процессов переноса кислорода рассматривался кислородный баланс трех районов: верхового, центрального и приплотинного (таблица 4.1). В отличие от баланса кислорода для всего водохранилища в расчетах для отдельных его районов оценивалось поступление и отток кислорода в результате процессов внутреннего водообмена: со стоковыми, плотностными, компенсационными и дрейфовыми течениями. Сезонные особенности кислородного баланса исследовались расчетом отдельно для летнего периода (с 1 июня по 1 сентября) и для зимнего периода, продолжительность которого ограничивалась датой установления ледостава и датой начала весеннего наполнения.

Таблица 4.1 – Разделение водохранилищ на районы, принятое при расчете кислородного баланса (нумерация отсеков соответствует рис. 3.10)

Водохранилище	Верховой район	Центральный район	Нижний район
Можайское	I-1 – I-7, II-1	I-8 – I-13	I-14 – I-18
Рузское	I-1	I-2, I-3, II-1	I-4
Озернинское	I-1	I-2, II-1	I-3, III-1
Истринское	I-1, I-2, II-1, III-1, VI-1	I-3	I-4, V-1

4.1.2. Кислородный баланс в летний период

Характерная структура кислородного баланса Можайского водохранилища представлена на примере летнего периода средневодного 1997 г. Общее уравнение баланса (в тоннах O₂) записывается следующим образом (4.1):

$$W_p + W_{бок} + W_{бр+} + W_{ос} + W_{атм+} + W_{ф} = W_{бр-} + W_{атм-} + W_{г/у} + W_{дф} + \\ + W_{дз} + W_{др} + W_{дет} + W_{сов} + W_{лов} + W_{нит} + W_{гр} + W_{овв} \pm \Delta W \quad (4.1)$$

где W_p – поступление кислорода с речным притоком, $W_{бр+}$ – поступление кислорода с боковым притоком, $W_{бр+}$ – поступление кислорода в результате берегового водообмена, $W_{ос}$ – поступление кислорода с осадками, $W_{атм+}$ – диффузионное поступление кислорода из атмосферы (инвазия), $W_{ф}$ – поступление кислорода в результате фотосинтеза фитопланктона, $W_{бр-}$ – отток кислорода в результате берегового водообмена, $W_{атм-}$ – отток кислорода в атмосферу (эвазия), $W_{г/у}$ – сток кислорода в нижний бьеф со сбросами воды гидроузлом, $W_{дф}$ – потребление кислорода на дыхание фитопланктона, $W_{дз}$ – потребление кислорода на дыхание зоопланктона, $W_{др}$ – потребление кислорода на дыхание рыб, $W_{дет}$ – затраты кислорода на окисление детрита, $W_{сов}$ – затраты кислорода на окисление стойкого органического вещества, $W_{лов}$ – затраты кислорода на разложение лабильного органического вещества, $W_{нит}$ – потребление кислорода на процесс нитрификации, $W_{гр}$ – потребление кислорода грунтами дна, $W_{овв}$ – потребление кислорода на окисление восстановленных соединений при изменении окислительных условий на восстановительные, $\pm \Delta W$ – изменение запаса кислорода в водоеме.

В начале лета запас кислорода в водоеме превышал 2900 т (приложение Г). Общее поступление кислорода в водоем за лето составило 12398 т, а суммарное потребление и отток – 14445 т; таким образом, к началу осени запас кислорода уменьшился более чем втрое и составил 827 т. Такая большая разница связана с тем, что в начальный период времени по результатам моделирования в водоеме наблюдалась активная вегетация диатомовых водорослей, существенно обогативших фотический слой растворенным кислородом. В другие годы, когда столь активной вегетации в начальный момент расчетного периода не происходило, изменения не были столь существенными и, к примеру, в 1996 г. составляли 241 т, а в 2012 г. – 331 т.

Поступление кислорода в водоем в это время года практически полностью определяется интенсивностью продукционных процессов

(рисунок 4.2, а). В летний период 1997 г. в Можайском водохранилище в результате фотосинтеза было спродуцировано 11800 т кислорода, что составило 95% от его суммарного поступления за это время. Еще 473 т (4%) поступило с речными водами и менее 1% приходной части баланса составил боковой приток, поступление с дождями, грунтовыми водами и из атмосферы.

Структура потребления кислорода в водохранилище гораздо сложнее (рисунок 4.2, б). Здесь фигурируют 12 расходных составляющих: 28% от суммарного потребления приходится на дыхание фитопланктона, 26% уходит в атмосферу из поверхностного слоя, 22% тратится на окисление растворенного лабильного и стойкого ОВ, 10% на дыхание зоопланктона, 5% на разложение

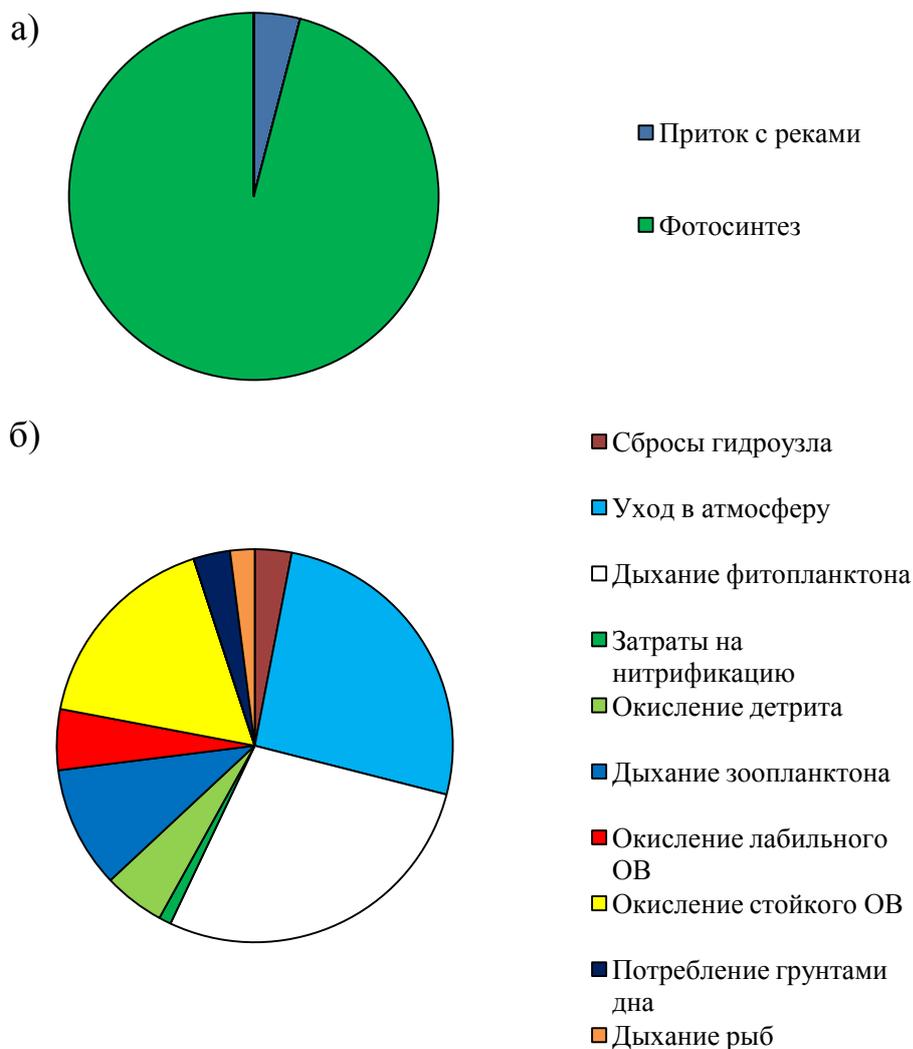


Рисунок 4.2 – Приходные (а) и расходные (б) составляющие кислородного баланса Можайского водохранилища в летний период 1997 г.

детрита, 3% сбрасывается в нижний бьеф и столько же поглощается донными отложениями, 2% потребляемого кислорода используется на дыхание рыб, 1% – на процесс нитрификации, менее 1% тратится окисление соединений железа и марганца.

При анализе изменчивости отдельных составляющих установлено, что их относительный вклад в баланс незначительно различается между водохранилищами (таблица 4.2): в приходной части баланса фотосинтез составляет 92–99%, максимальная доля речного и бокового притоков во всех случаях составляет 4%, поступление из атмосферы в летний период невелико и достигает лишь 3%. Среди расходных составляющих баланса наблюдается более широкий диапазон изменений: величина эвазии изменяется в диапазоне от 16 до 35%, на дыхание фитопланктона затрачивается от 27 до 37% от общего расхода растворенного кислорода в водохранилищах, на дыхание зоопланктона и рыб затрачивается до 11 и 3% соответственно, на окисление детрита потребляется от 3 до 8% расходуемого в летний период кислорода, на окисление стойкого растворенного ОВ – от 8 до 23%, на окисление лабильного ОВ – от 3 до 11%, от 1 до 7% растворенного кислорода потребляется грунтами дна, от 1 до 5% – при процессе нитрификации, и менее 1% тратится на окисление восстановленных при полном отсутствии кислорода соединений железа и марганца. Сток в нижний бьеф составляет до 10% от общих потерь растворенного кислорода в летний период.

Из всех перечисленных переменных наибольший интерес представляет большой вклад в расходную составляющую кислородного баланса процесса эвазии. В литературе встречаются упоминания о том, что в эвтрофных озерах при активно протекающих продукционных процессах эвазия кислорода может становиться одним из главных факторов его потерь [Самойленко, 1992].

Влияние водности года на кислородный баланс весьма неоднозначно. Модельными расчетами для трех лет, различающихся по водности: маловодного 1975, средневодного 1997 и многоводного 1990 гг. показано, что структура кислородного баланса не претерпевает особенных изменений.

Таблица 4.2 – Диапазон величин составляющих кислородного баланса Можайского (М), Рузского (Р), Озернинского (О) и Истринского (И) водохранилищ в летний период по результатам диагностических модельных расчетов

Водохранилище	Форма выражения	ПРИТОК						СТОК											
		Приток с реками	Боковой приток	Обмен с дном	Осадки	Фотосинтез	Поступление из атмосферы	Обмен с дном	Сбросы гидроузла	Уход в атмосферу	Дыхание фитопланктона	Загрязнение на нитрификацию	Окисление детрита	Дыхание зоопланктона	Окисление лабильного ОВ	Окисление стойкого ОВ	Окисление восстановленных веществ	Погребление грунтами дна	Дыхание рыб
М	гонн	86–640	9,8-78	0	34-93	8307-23926	0-399	0-42	42-448	1935-7831	3046-8961	138-380	367-1480	439-1647	540-2160	1225-2924	4,2-35	274-420	0-368
	%	1-4%	0-1%	0%	0-1%	94-99%	0-3%	0%	0-3%	22-32%	28-37%	1-2%	3-7%	3-11%	4-11%	8-18%	0%	1-4%	0-3%
Р	гонн	47-743	28-398	0%	35-86	6747-14617	0-2,9	2,7-38	391-111	2160-5298	2355-4543	101-233	240-461	225-646	311-777	1115-2179	5,4-17	159-331	164-275
	%	0-5%	0-4%	0%	0-1%	92-99%	0%	0%	3-10%	26-35%	28-36%	1-2%	2-4%	3-7%	3-6%	11-19%	0%	1-4%	2-3%
О	гонн	57-174	13-131	0	33-52	2795-6348	0-48	5,2-14	258-401	578-1856	1002-2040	153-222	145-271	146-479	159-275	840-1383	4-53	127-246	119-184
	%	1-3%	1-2%	0%	1%	92-97%	0-2%	<1%	5-7%	16-30%	27-32%	2-5%	2-4%	2-7%	3-4%	15-23%	0%	2-5%	2-4%
И	гонн	108-286	94-245	0	42-79	5232-7766	0-46	1,8-21	106-407	907-2116	1773-2784	129-320	275-485	452-839	250-419	1107-1502	4-13	328-428	208-281
	%	2-4%	1-3%	0%	1%	92-96%	0-1%	0%	1-6%	15-25%	28-32%	2-4%	3-6%	7-10%	3-5%	13-18%	0%	4-7%	3-4%

Так, к примеру, несмотря на то, что в средневодный год расчеты показали уменьшение продукции кислорода фитопланктоном по сравнению с маловодным 1975 г., в летний период многоводного года продукция в Озернинском и Рузском водохранилищах даже превышала значения, полученные для маловодного (рисунок 4.3). Не выявлено существенных закономерных различий между годами и для расходной части кислородного баланса (рисунок 4.4).

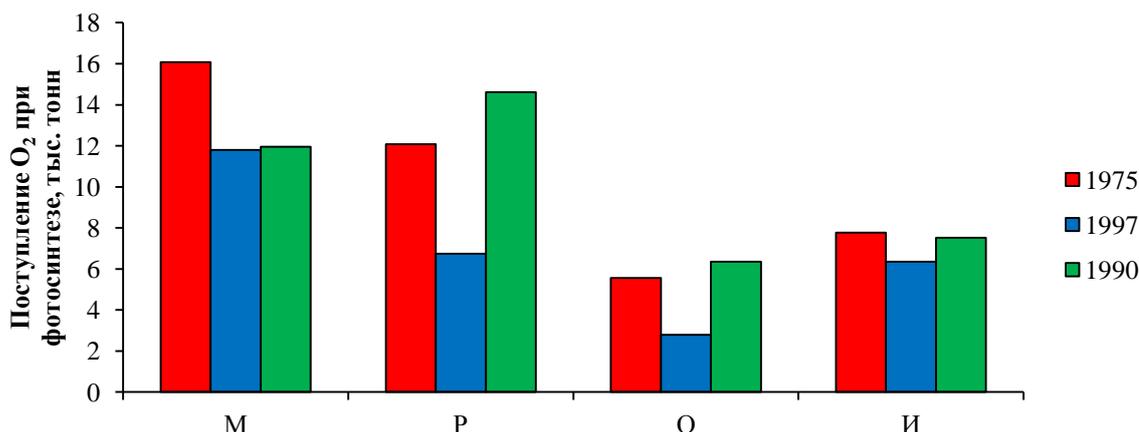


Рисунок 4.3 – Продукция кислорода в результате фотосинтеза за летний период в Можайском (М), Рузском (Р), Озернинском (О) и Истринском (И) водохранилищах в маловодном 1975, средневодном 1997 и многоводном 1990 гг.

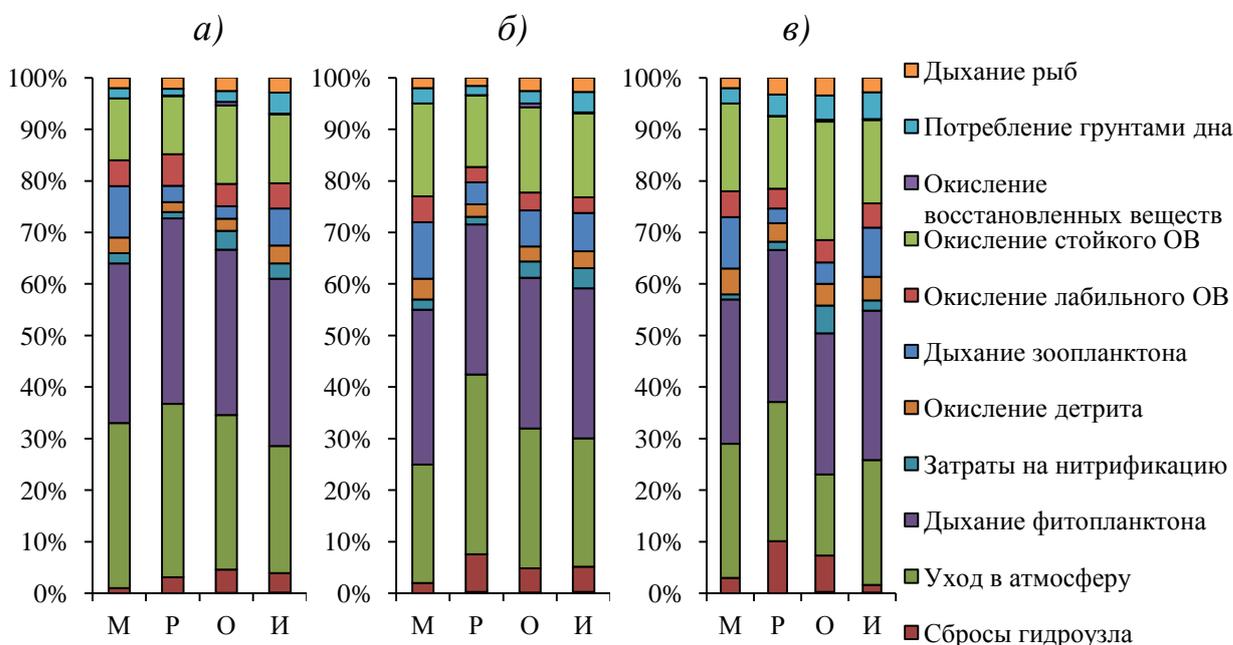


Рисунок 4.4 – Структура расходной части кислородного баланса в летний период в Можайском (М), Рузском (Р), Озернинском (О) и Истринском (И) водохранилищах в маловодном 1975 (а), средневодном 1997 (б) и многоводном 1990 (в) гг.

Особый интерес представляет сопоставление структуры кислородного баланса районов водохранилищ. Большой вклад в обогащение водной толщи кислородом, особенно в условиях её стратифицированности, вносят течения. В средневодном 1997 г. в Можайском водохранилище они обеспечивали 39% суммарного притока кислорода в верховой район, 64% притока в центральный и 47% – в приплотинный район. При этом в верховьях наибольший вклад вносили компенсационные течения (27% от суммарного притока), а в центральном и приплотинном районе – дрейфовые (до 35% в приплотинной части). В расходной части баланса вклад внутриводоемной динамики также очень велик и обеспечивает в среднем 50% от суммарного расхода кислорода (от 47% в верховьях и нижней части до 65% в центральной). Преобладают также дрейфовые течения, с которыми в соседние районы выносятся до 37% (в центральном районе) от общей потери кислорода; велик и вклад компенсационных течений (до 24%).

Фактором, определяющим возникновение и развитие течений, являются гидрометеорологические условия в летний период. При установлении антициклонического типа погоды усиливается плотностная стратификация водной толщи, в результате чего в водоемах активизируются плотностные течения. Так, для верхового района Можайского водохранилища получена связь доли плотностных течений в расходной части кислородного баланса верхового района со средней температурой воздуха за летний период (рисунок 4.5, а). Сильно увеличивается и значимость дрейфовых течений в переносе растворенного кислорода: так, при увеличении средней за лето скорости ветра с 1,5 до 3 м/с вклад дрейфовых течений в расходную часть баланса кислорода в верховом районе возрастает от 15 до 45% (рисунок 4.5, б). Аналогичные закономерности получены и для других водохранилищ.

Модельные оценки показывают, что за летний период из верхового района водохранилищ в центральный и приплотинный может переноситься до 1200 т кислорода, преимущественно за счет дрейфовых течений. Плотностные

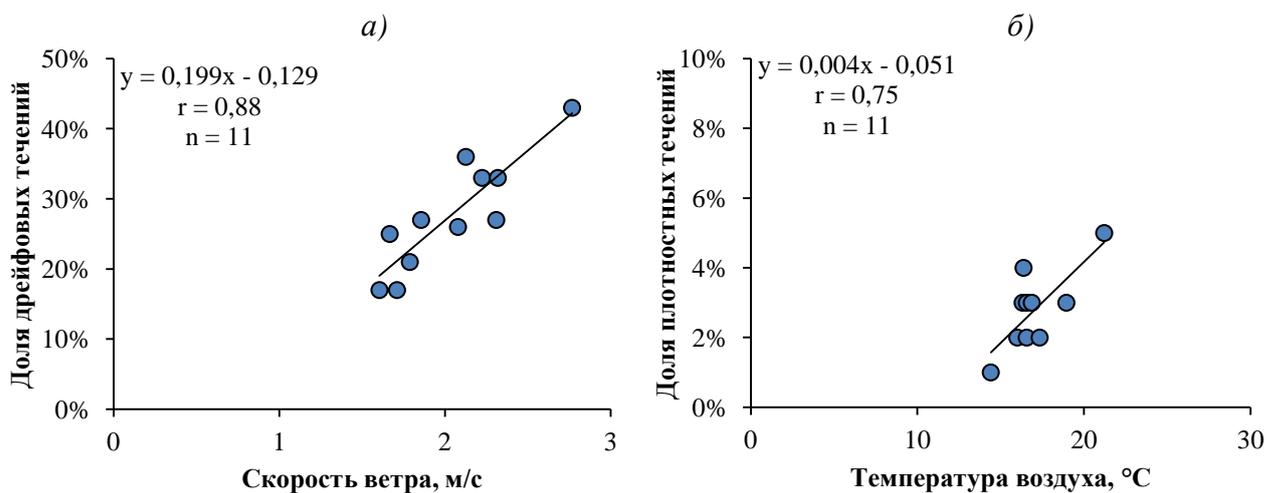


Рисунок 4.5 – Связи доли плотностных течений в расходной части кислородного баланса верхового района Можайского водохранилища со средней за летний период скоростью ветра (а) и со средней за тот же период температурой воздуха (б)

течения переносят кислород из верхового района в центральный; часто возникают и плотностные потоки, направленные вверх по водохранилищу, вследствие чего результирующая плотностного переноса для приплотинного района всех водохранилищ за исключением Озернинского – отрицательная. Обогащению верховьев водохранилищ растворенным кислородом способствуют возникающие в них компенсационные течения (таблица 4.3). Примечательно, что согласно расчетам в результате процессов внутриводоемного переноса (без учета химико-биологических процессов) запас растворенного кислорода в верховых районах водохранилищ сокращается в летний период на 100–300 т (приложение Д), что составляет около 30–120% запаса кислорода в этом районе в начале лета.

Тем не менее, полученные результаты дают четкое представление о ведущей роли продукции фитопланктона в поступлении растворенного кислорода в водохранилища Москворецкой водохозяйственной системы. Но вклад фитопланктона в обогащение разных районов водохранилищ растворенным кислородом неодинаков. Например, в верхней части Можайского водохранилища летом средневодного 1997 г. доля фотосинтеза в приходной

Таблица 4.3 – Средние значения количества растворенного кислорода (в тоннах), переносимого течениями, в разных районах водохранилищ Московорецкой водохозяйственной системы

Водоем	Стоковое течение			Плотностные течения			Компенсационные течения			Дрейфовые течения		
	Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ
ВЕРХОВОЙ РАЙОН												
Можайское	0,0	361	-361	170	272	-102	1304	717	588	1064	1593	-530
Рузское	0,0	402	-402	100	139	-39	163	124	39	342	281	62
Озернинское	0,0	162	-162	106	235	-128	397	111	286	285	418	-133
Истринское	0,0	210	-210	259	615	-356	1382	570	812	982	1403	-421
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ РАЙОН												
Можайское	361	406	-45	932	679	253	3766	3308	459	4213	4889	-676
Рузское	487	907	-420	935	776	159	1349	1413	-65	2061	2036	26
Озернинское	191	229	-38	732	1556	-825	2585	1539	1046	2273	2530	-257
Истринское	210	207	3,0	1211	653	558	1941	2756	-816	2945	2721	224
НИЖНИЙ РАЙОН												
Можайское	406	0,0	406	509	659	-150	2003	3050	-1047	3826	2620	1206
Рузское	472,2	0,0	472	342	500	-159	979	1098	-119	1601	1322	279
Озернинское	270,7	0,0	271	1981	802	1179	1571	3491	-1920	3074	2330	745
Истринское	227,7	0,0	228	469	663	-194	1468	1558	-90	1945	1663	282

Примечание: Δ – разность между притоком и стоком растворенного кислорода, переносимого определенным видом течений

части баланса составляла 50%, в центральной части его вклад уменьшался до 30%, а в нижнем районе возрастал до 46%. Сходные тенденции характерны и для остальных водохранилищ. Подобные различия обусловлены чрезвычайной пространственной неоднородностью интенсивности продукционных процессов: в верховьях водохранилища происходит максимальная подпитка биогенными веществами, поступающими с речным стоком, а небольшая глубина создает благоприятные условия для развития клеток водорослей.

Интересны различия вклада фотосинтеза в поступление кислорода в различные районы водохранилищ в зависимости от водности года. Так, в Можайском и Рузском водохранилищах четко отмечается снижение доли этой составляющей с увеличением водности (рисунок 4.6, а, б). В Озернинском водохранилище в многоводный год доля фотосинтеза сопоставима с маловодным, а в верховьях Истринского водохранилища вообще отмечено

увеличение вклада продукции кислорода фитопланктоном с увеличением водности (рисунок 4.6, г).

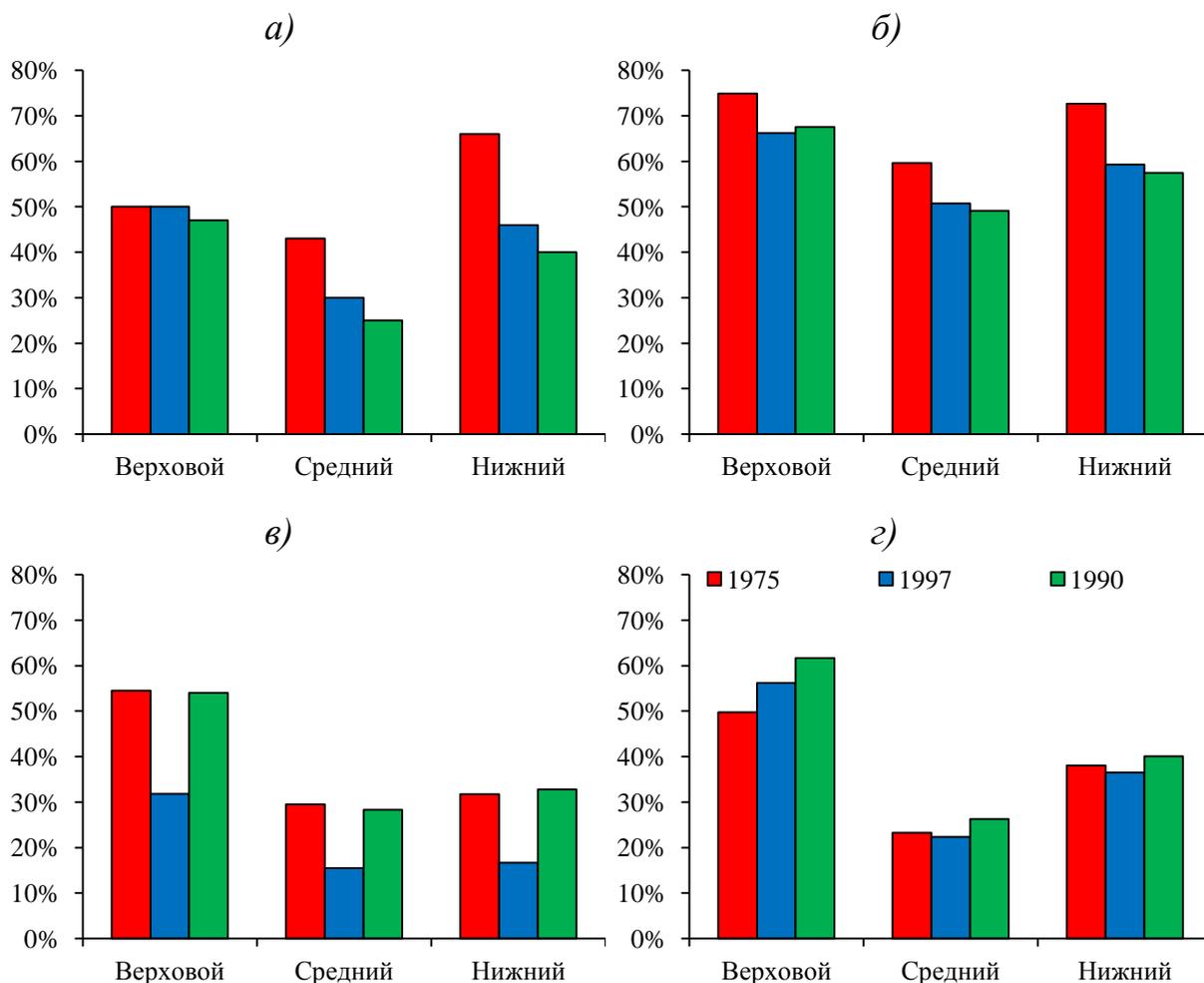


Рисунок 4.6 – Доля фотосинтеза в приходной части баланса кислорода районов Можайского (а), Рузского (б), Озернинского (в) и Истринского (г) водохранилищ летний период в годы различной водности: маловодный 1975, средневодный 1997 и многоводный 1990 гг.

Из химико-биологических процессов в расходование кислорода во всех районах водохранилищ максимален вклад затрат на дыхание фитопланктона, изменяясь пропорционально величине поступления РК при фотосинтезе. К примеру, в летний период 1997 г. в верховьях Можайского водохранилища в атмосферу уходило 9% спродуцированного кислорода, столько же – в центральном, и 15% – в приплотинном районе.

Таким образом, с использованием математического моделирования оценены как сложнейшая структура кислородного баланса исследуемых водохранилищ в целом, так и вклад гидрофизических и химико-биологических процессов в поступление и расходование растворенного кислорода в разных районах водохранилища.

4.1.3. Кислородный баланс в период ледостава

Так как серьезных различий в структуре кислородного баланса рассматриваемых водоемов в летний период не наблюдается, можно предположить, что и в зимний период балансы кислорода в московских водохранилищах будут идентичны, поэтому аналогичные расчеты баланса для зимнего периода проведены только на примере Можайского водохранилища. В качестве расчетных лет выбраны два года, различающиеся по уровенному режиму и режиму регулирования: зима 1999/2000 г., когда объем водохранилища уже к середине зимы был сработан практически до УМО и происходило накопление зимних речных вод в водоеме, и зимний период 1997/1998 г., когда практически всю зиму сброс составлял около $15 \text{ м}^3/\text{с}$, а вследствие оттепели, предшествующей половодью, наполнение водохранилища началось в конце февраля.

Ввиду различного характера внутреннего водообмена в фазу зимней сработки водохранилища и в начале фазы весеннего наполнения при наличии ледостава кислородный баланс рассчитывался для этих временных промежутков отдельно, граница определялась по минимальному уровню, наблюдавшемуся в водохранилище в зимний период. Даты замерзания и вскрытия водохранилища, как и составляющие баланса кислорода, определялись модельным расчетом (таблица 4.4).

В зимний период число составляющих баланса уменьшается за счет прекращения газообмена водоема с атмосферой, поступления кислорода с осадками, а также ввиду отсутствия дрейфового переноса, который, как было

показано в предыдущем разделе, вносит значительный вклад в перераспределение растворенного кислорода в водохранилище в летний период.

Таблица 4.4 – Характерные даты периода ледостава 1997/1998 и 1999/2000 гг. в Можайском водохранилище по результатам моделирования

Год	Дата замерзания водоема	H_{\min} , м БС	Дата наблюдения H_{\min} в водохранилище	Дата вскрытия водоема ото льда
1997/1998	30.11.1997	179,76	25.02.1998	24.04.1998
1999/2000	18.11.1999	175,23	05.04.2000	17.04.2000

Результаты модельных расчетов подтверждают, что единственным существенным источником растворенного кислорода в период ледостава являются речные воды: в период зимней сработки рассматриваемых лет их вклад в приходную часть баланса достигал 90%. Объем поступления растворенного кислорода с речным притоком составлял 300–430 т (таблица 4.5). Что касается подледного фотосинтеза, то, несмотря на встречающиеся в литературе упоминания об этом явлении, модельными расчетами получено, что поступление кислорода вследствие его продуцирования фитопланктоном в зимнее время не превышает 3 т, что составляет менее 1% от суммы поступления кислорода в период ледостава.

Структура расходной части баланса водохранилища в зимний период во многом определяется режимом регулирования гидроузла. В 1997/1998 г., зимний период которого характеризовался большой величиной сбросов в нижний бьеф, вклад этой составляющей в расходную часть баланса превышал 50%. В 1999/2000 г., когда сбросы были минимальны, их доля снизилась до 30%.

При понижении температуры воды скорости протекания химико-биологических процессов заметно снижаются, ввиду чего вклад большинства из них в баланс кислорода становится незначительным. В зимнее время из процессов этой группы преобладают два: потребление кислорода грунтами дна

Таблица 4.5 – Структура кислородного баланса в период ледостава 1997/1998 и 1999/2000 гг. в Можайском водохранилище по результатам моделирования

Период	ПРИТОК				СТОК											Запас	
	Приток с реками	Боковой приток	Обмен с дном	Фотосинтез	Обмен с дном	Сбросы гидроузла	Дыхание фитопланктона	Загрязнения на нитрификацию	Окисление детрита	Дыхание зоопланктона	Окисление лабильного ОВ	Окисление стойкого ОВ	Окисление восстановленных веществ	Потребление грунтами дна	Дыхание рыб	начальный	конечный
30.11.1997-25.02.1998	433	52	0,0	0,0	0,7	808	0,9	11	14	26	39	363	1,0	234	26	2202	1172
	89%	11%	0%	0%	0%	53%	0%	1%	1%	2%	3%	24%	0%	15%	2%		
25.02.1998-24.04.1998	1647	188	0,0	1,1	120	511	0,9	8,8	9,5	5,5	5,9	351	1,0	141	15	1172	1881
	90%	10%	0%	0%	10%	44%	0%	1%	1%	0%	1%	30%	0%	12%	1%		
18.11.1999-05.04.2000	315	37	0,0	0,0	2,6	304	1,2	8,4	22	34	53	275	1,6	273	41	1092	661
	90%	10%	0%	0%	0%	30%	0%	1%	2%	3%	5%	27%	0%	27%	4%		
05.04.2000-20.04.2000	1676	192	0,0	3,3	118	256	0,3	1,9	3,0	0,6	1,0	81	0,4	28	4,0	661	1884
	90%	10%	0%	0%	24%	52%	0%	0%	1%	0%	0%	16%	0%	6%	1%		

и окисление детрита и растворенного органического вещества (преимущественно спродуцированного в водохранилище в вегетационный период). Доля первого из них в расчетные годы составляет 15–27% от суммарного расхода кислорода в водоеме в период зимней сработки (234–273 т). Вклад минерализации растворенного и взвешенного органического вещества составляет 28–34% в зависимости от режима регулирования гидроузла. Вклад прочих химико-биологических процессов, таких как дыхание или нитрификация, чрезвычайно мал и не превышает 1–2%.

Таким образом, к концу фазы зимней сработки в Можайском водохранилище запас растворенного кислорода сильно уменьшается: в 1997/1998 г. почти в 2 раза (от 2202 т к моменту замерзания до 1172 т к моменту начала поступления в водоем вод половодья), в 1999/2000 г. – не столь значительно (от 1092 до 661 т), однако относительное изменение запаса кислорода в обоих случаях превышает 40% и является весьма существенным.

Во второй половине периода ледостава, когда в водохранилище наблюдается рост уровня вследствие активного поступления талых вод,

происходит пополнение запаса растворенного кислорода: так, в многоводном 1998 году к моменту вскрытия запас РК в водоеме увеличился на 700 тонн, а в 2000 году – почти втрое.

Наиболее интересным представляется рассмотрение пространственной неоднородности структуры кислородного баланса водохранилищ в период зимней сработки в зависимости от режима регулирования.

Как уже упоминалось в главе 2, в зимний период важнейшую роль в переносе растворенного кислорода по водохранилищу играют течения, которые препятствуют его полному истощению. Полученные результаты позволяют количественно оценить вклад этих процессов при различных условиях водообмена.

Очевидно, что в верховом районе водохранилища в приходной составляющей баланса кислорода доминирует поступление РК с речными водами, составляющее до 80% в межень, характеризующуюся оттепелями и существенным речным притоком, и менее 40% в глубокую межень (рисунок 4.7). В центральном и приплотинном районах 20–40% кислорода поступает со стоковым течением, а также с возникающими в это время плотностными и компенсационными течениями, вклад которых достигает 70% от суммарного притока кислорода.

В расходной части баланса при интенсивном сбросе воды в нижний бьеф в период зимней сработки доля течений в переносе между районами может достигать 90%, а при минимальном сбросе – до 80%. Остальные 10–20% примерно поровну распределяются между поглощением кислорода грунтами дна и деструкцией ОВ. При этом вклад первого процесса уменьшается от верховьев к плотине от 8–19 до 3–6%, а вклад окисления ОВ и детрита, напротив, увеличивается от 5 до 15%.

От верховьев к плотине уменьшается роль стокового течения в переносе кислорода в соседние районы и возрастает значимость других видов течений. Так, доля плотностных течений в переносе кислорода в центральный район достигает 50% (650 т за период зимней сработки). Также примечательно

возникновение в 2000 г. при малых сбросах в нижний бьеф компенсационных течений, направленных вверх по водохранилищу, с которыми происходило до 56% оттока кислорода из приплотинного района.

По результатам расчетов потоков кислорода с течениями (таблица 4.6) можно сделать вывод, что с плотностными течениями из верхового в

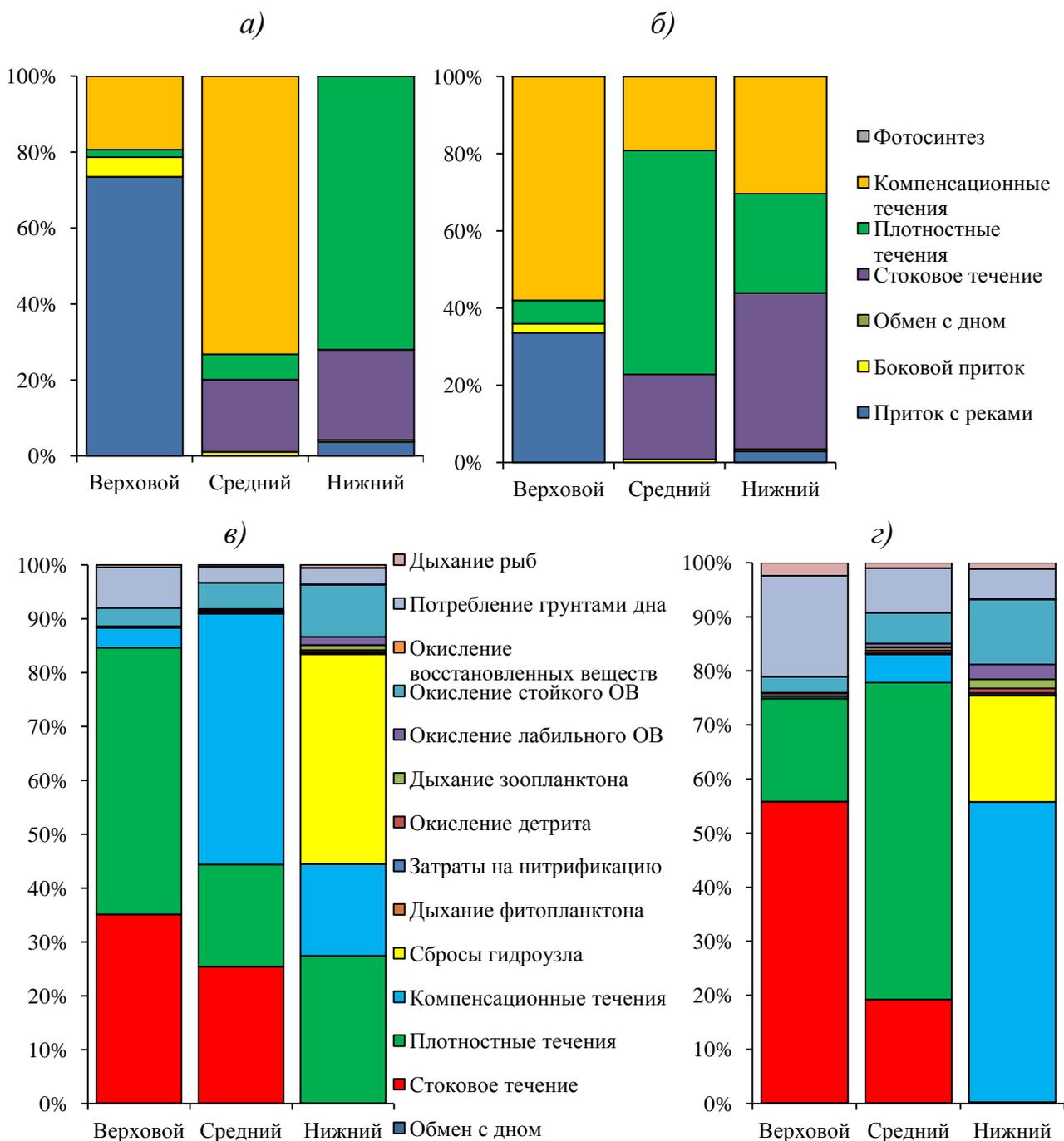


Рисунок 4.7 – Структура приходной (а, б) и расходной (в, г) части кислородного баланса в период зимней сработки в Можайском водохранилище в 1997/1998 (а, в) и 1999/2000 (б, г) гг.

центральный и приплотинный районы водохранилища может поступать до 790 т растворенного кислорода, что препятствует возникновению заморных явлений в зимний период. Расчетами установлен значительный вклад компенсационных течений в поступление кислорода из приплотинного района водохранилища в центральный, возрастающий при снижении сбросов в нижний бьеф до санитарного расхода воды.

Таблица 4.6 – Средние значения количества растворенного кислорода, переносимого внутриводоемными течениями в разных районах Можайского водохранилища в зимний период 1997/1998 и 1999/2000 гг.

Район	Форма выражения	Стоковое течение			Плотностные течения			Компенсационные течения		
		Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ
Период зимней сработки 1999/2000 г.										
Верховой район	тонны	0,0	223	-223	7,3	76	-69	72	1,7	71
	%	0%	56%		2%	19%		19%	0%	
Центральный район	тонны	223	261	-38	79	799	-721	860	72	787
	%	19%	19%		7%	59%		73%	5%	
Нижний район	тонны	261	0,0	261	792	2,1	790	0,0	858	-858
	%	24%	0%		72%	0%		0%	56%	
Период зимней сработки 1997/1998 г.										
Верховой район	тонны	0,0	461	-461	70	650	-580	670	49	621
	%	0%	35%		6%	49%		58%	4%	
Центральный район	тонны	461	617	-156	1217	461	756	401	1132	-731
	%	22%	25%		58%	19%		19%	47%	
Нижний район	тонны	617	0,0	617	391	567	-176	462	352	110
	%	41%	0%		26%	27%		30%	17%	

Во второй фазе периода ледостава, когда происходит наполнение водохранилища, сильно возрастает доля стокового переноса кислорода, которая достигает 60% и в приходной, и в расходной части баланса (приложение Д). Вклад химико-биологических процессов в потребление кислорода в это время невелик и в сумме не превышает 10%.

Количественные оценки вклада различных процессов в баланс кислорода в Можайском водохранилище в период зимней сработки с учетом внутриводоемного переноса получены впервые и были бы невозможны без использования аппарата математического моделирования.

4.2. Исследование формирования и развития гипоксидной зоны

4.2.1. Обоснование исследования

Условия, при которых происходит формирование и развитие гипоксидной зоны – ключевой момент при изучении кислородного режима водохранилищ, так как бескислородные условия вызывают наиболее негативные последствия для качества воды и рыбного хозяйства. На основе данных наблюдений практически невозможно выявить зависимости бескислородных условий от определяющих внешних факторов, тогда как математическое моделирование делает эту задачу выполнимой.

В рамках изучения формирования и развития гипоксидной зоны в водохранилищах Москворецкой водохозяйственной системы рассмотрено влияние двух определяющих факторов:

- водности года;
- погодных условий летнего периода.

Для сравнения различных по условиям лет рассчитывались объемы водных масс, обедненных растворенным кислородом, их доля в общем объеме воды и периоды их существования в водохранилищах.

Первой границей гипоксии водной массы принималось значение содержания растворенного кислорода 6 мг/л в соответствии с приказом Федерального агентства по рыболовству от 18.01.2010 №20 [Приказ..., 2010], где в качестве рыбохозяйственного ПДК для водных объектов в летний период принимается именно эта концентрация РК.

Другой границей гипоксии выбрано значение содержание РК 2 мг/л, так как при этой концентрации происходит смена окислительных условий в водной среде на восстановительные, а аэробные процессы сменяются анаэробными [Даценко, 2007].

Наконец, отдельно оценивались объемы зоны аноксии, то есть полного отсутствия кислорода.

4.2.2. Развитие бескислородных условий в различные по водности годы

Для изучения особенностей развития бескислородных условий в исследуемых объектах выбраны три года: маловодный 1975 г., средневодный 1997 г. и многоводный 1990 г. Водность года определялась по обеспеченности суммарного годового притока к Можайскому водохранилищу, ввиду того, что водный баланс этого водоема рассчитывается с максимальной точностью, а также из-за синхронности условий формирования стока на водосборах исследуемых водохранилищ.

Характеристики гипоксидной и аноксидной зоны Москворецких водохранилищ приведены в сводной таблице 4.7.

Возникновение зоны с содержанием O_2 менее 6 мг/л происходит в мае при установлении антициклональной погоды и формировании температурной стратификации. По данным модельных расчетов в маловодный год это происходит на 5–10 дней раньше, чем в многоводный. В дальнейшем при постепенном потреблении кислорода на окисление детрита и дыхание гидробионтов начинает формироваться зона острой гипоксии с содержанием O_2 менее 2 мг/л. Происходит это по данным модельных расчетов в последних числах мая – начале июня. В Можайском и Рузском водохранилищах ввиду их большей глубоководности и, как следствие, бóльших запасов кислорода в гипolimнионе, появление гипоксидного слоя происходит 1–10 июня, тогда как в более мелководных Истринском и Озернинском водохранилищах подобные явления наблюдаются уже 25–28 мая. В водоемах продолжает происходить постепенное истощение запасов РК, и в последней декаде июня во всех водохранилищах уже обнаруживается слой с полным отсутствием растворенного кислорода.

В течение летнего периода объем гипоксидной и аноксидной водных масс увеличивается в соответствии с синоптическими условиями и развитием процессов фотосинтеза (рисунок 4.8). Резкие колебания объемов зоны гипоксии

Таблица 4.7 – Характеристики зон гипоксии и аноксии в водохранилищах Москворецкой водохозяйственной системы, полученные модельными расчетами для лет различной водности

Год	Объем водных масс с содержанием растворенного кислорода менее 6 мг/л, % от объема водохранилища	Объем водных масс с содержанием растворенного кислорода менее 2 мг/л, % от объема водохранилища	Объем водных масс с отсутствием растворенного кислорода, % от объема водохранилища	Объем водных масс с содержанием растворенного кислорода менее 6 мг/л, млн м ³	Объем водных масс с содержанием растворенного кислорода менее 2 мг/л, млн м ³	Объем водных масс с отсутствием растворенного кислорода, млн м ³	Дата максимального объема зоны гипоксии (менее 6 мг/л)	Дата максимального объема зоны гипоксии (менее 2 мг/л)	Дата максимального объема зоны аноксии (0 мг/л)	Период существования водных масс с содержанием O ₂ < 6 мг/л, сут	Период существования водных масс с содержанием O ₂ < 2 мг/л, сут	Период существования водных масс с отсутствием O ₂ , сут	Нср, м БС	Уровень сработки водохранилища за летний период, м
Можайское водохранилище														
1975	58%	39%	22%	111	69	38	05.июл	29.июл	29.июл	153	119	99	181,22	1,79
1997	56%	33%	15%	143	59	27	15.авг	11.авг	12.авг	131	101	70	181,60	2,45
1990	63%	27%	9%	150	44	15	24.авг	22.авг	20.авг	124	100	63	181,46	0,67
Рузское водохранилище														
1975	66%	45%	34%	111	75	57	08.авг	08.авг	08.авг	157	134	108	181,12	1,42
1997	52%	40%	24%	167	76	46	16.авг	05.авг	04.авг	133	117	85	181,67	1,67
1990	56%	29%	14%	135	52	25	24.авг	22.авг	21.авг	125	96	60	181,36	0,94
Озернинское водохранилище														
1975	62%	41%	28%	71,8	48,0	31,9	08.авг	08.авг	08.авг	155	139	111	181,47	1,38
1997	59%	35%	20%	68,3	40,0	23,4	11.авг	11.авг	11.авг	127	103	84	181,43	1,30
1990	55%	29%	20%	65,5	34,5	23,4	22.авг	22.авг	21.авг	122	89	79	181,10	0,83
Истринское водохранилище														
1975	56%	36%	16%	82,16	52,09	23,3	08.авг	07.авг	08.авг	156	131	121	168,95	0,81
1997	45%	26%	15%	89,45	57,69	32,62	13.авг	13.авг	13.авг	127	109	100	169,31	0,34
1990	62%	35%	19%	98,91	56,1	31,17	07.июл	11.июл	21.июл	116	108	92	168,87	0,42

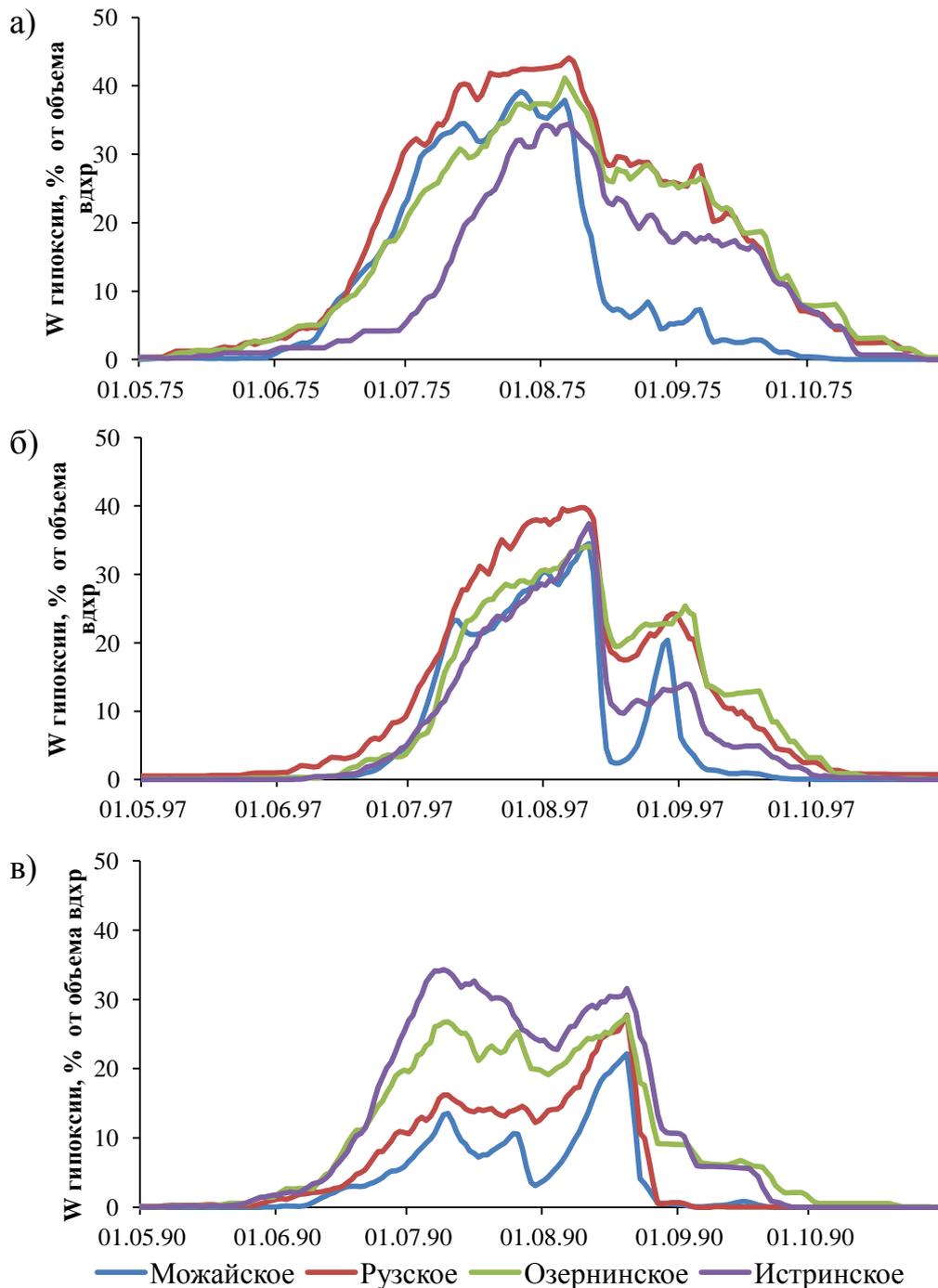


Рисунок 4.8 – Изменение объема зоны гипоксии с содержанием растворенного кислорода <2 мг/л (в % от объема всего водохранилища) в водохранилищах Москворецкой водохозяйственной системы в маловодном 1975 (а), средневодном 1997 (б) и многоводном 1990 (в) годах

обусловлены гидрометеорологическими условиями вегетационного периода – при кратковременных похолоданиях, сопровождающихся большой скоростью ветра, происходит разрушение плотностной стратификации и обогащение

водной толщии растворенным кислородом. Это приводит к уменьшению объема зоны гипоксии, однако, при последующем установлении антициклонального типа погоды поступающий кислород довольно быстро расходуется на окисление органического вещества и дыхание биоты.

Максимальные объемы гипоксидной и аноксидной зон существенно различаются в зависимости от водности года. Так, в Можайском водохранилище максимальная доля зоны острой гипоксии с содержанием РК менее 2 мг/л в многоводный год составляет 27% от объема водохранилища, в средневодный год она увеличивается до 35%, а в маловодный год – до 39%.

В Рузском водохранилище наблюдаются похожие закономерности изменений зоны гипоксии вследствие сходных с Можайским водохранилищем морфометрических параметров – относительной глубоководности, удлиненности, относительной расчлененности акватории. Для Озернинского водохранилища водность года сказывалась на развитии зоны гипоксии также, как и в Можайском и Рузском. Лишь для Истринского водохранилища модельными расчетами не получено существенных различий в доле гипоксидной зоны от общего объема воды между маловодным и многоводным годом.

В отличие от зон острой гипоксии и аноксии, для объема зоны с содержанием РК менее 6 мг/л не выявлено четкой связи с водностью года. Это связано с тем, что низкое содержание растворенного в воде кислорода может наблюдаться во всей афотической толще, где отсутствует фотосинтез, в то время как границы зоны острой гипоксии с содержанием РК менее 2 мг/л обычно схожи с границами гипоплимниона.

Если сравнивать характеристики водохранилищ по бескислородным условиям, в маловодный и средневодный годы максимальные объемы зоны острой гипоксии с содержанием O_2 менее 2 мг/л наблюдались согласно расчетам в Рузском и Можайском водохранилищах, и только в многоводный год – в Истринском.

Постепенное исчезновение гипоксидной водной массы в водохранилищах начинается в конце августа - начале сентября вследствие снижения вертикальной устойчивости водной толщи из-за теплоотдачи верхних слоев и установления стабильной циклональной погоды. Однако при установлении антициклональной теплой погоды в сентябре и активизации продукционных процессов может вновь произойти ухудшение кислородных условий в гипolimнионе. Так, в 1990 и 1997 гг. в начале осени увеличение объема гипоксидной зоны – следствие развития диатомовых водорослей, что приводит к увеличению затрат кислорода на окисление их отмерших клеток.

Длительность существования в исследуемых водохранилищах водных масс с содержанием РК менее 6 мг/л оценивается в 116–157 суток, с его содержанием менее 2 мг/л – 89–139 суток, а аноксидной водной массы – от 60 до 121 суток.

Таким образом, модельными расчетами показаны различия в кислородном режиме водохранилищ Москворецкой водохозяйственной системы в зависимости от водности года.

4.2.3. Влияние погодных условий в летний период на развитие гипоксидной зоны

Синоптическая ситуация, наблюдающаяся летом, может оказывать большее влияние на кислородный режим, чем водность года, так как именно прогрев водной толщи приводит к её стратификации по плотности, а также активизации химико-биологических процессов. В циклональную погоду с большими скоростями ветра нарушается устойчивость водной толщи, не столь интенсивны процессы продуцирования ОВ автотрофными организмами. Конвективное перемешивание в совокупности с низкой интенсивностью процессов продуцирования ОВ приводят к тому, что при циклоническом типе погоды бескислородные условия в гипolimнионе не возникают.

Особенно важно рассмотреть изменения объема гипоксидной зоны при наступлении аномально жаркой погоды. При длительном сохранении безветренной солнечной погоды с высокой температурой воздуха может создаться катастрофическая ситуация для водных гидробионтов в связи с сильнейшим истощением запасов растворенного кислорода. Потому в данном разделе внимание уделено именно влиянию жаркой погоды на кислородный режим.

В качестве информационной основы для исследования взят средний по водности 1997 г. Средняя температура воздуха в летний период по данным метеостанции Можайск в этом году составила 17,3 °С. Для оценки воздействия жаркого периода на кислородный режим был разработан сценарный расчет, в котором с 3 июля по 18 августа ежесуточные гидрометеорологические данные заменены на наблюдавшиеся в этот же период аномально жаркого 2010 г., средняя температура воздуха за который составила 25,0 °С, а средняя за лето температура воздуха – 21,2 °С, что является максимумом за весь период наблюдений на метеостанции Можайск. За всю оставшуюся часть года входные данные изменениям не подвергались.

Сопоставление диагностических и сценарных расчетов показало, что при установлении жаркой погоды во всех рассматриваемых водоемах происходит ухудшение кислородных условий. В Можайском и Озернинском водохранилищах максимальная доля в общем объеме водной массы с содержанием РК менее 6 мг/л увеличивается на 2%, в Рuzском – на 4%, а в Истринском отмечается максимальный рост – 17%.

Объемы зон острой гипоксии и аноксии тоже увеличиваются, как и их доля в объеме водохранилищ. На рисунке 4.9 видно, что из-за устойчивой антициклональной погоды происходит некоторая стабилизация объема гипоксидной и аноксидной зон в соответствии с верхней границей гиполимниона. В отличие от 1997 г., по сценарному расчету нет непродолжительных похолоданий во второй половине августа, ставших в 1997 г. причиной кратковременного нарушения стратификации и обогащения

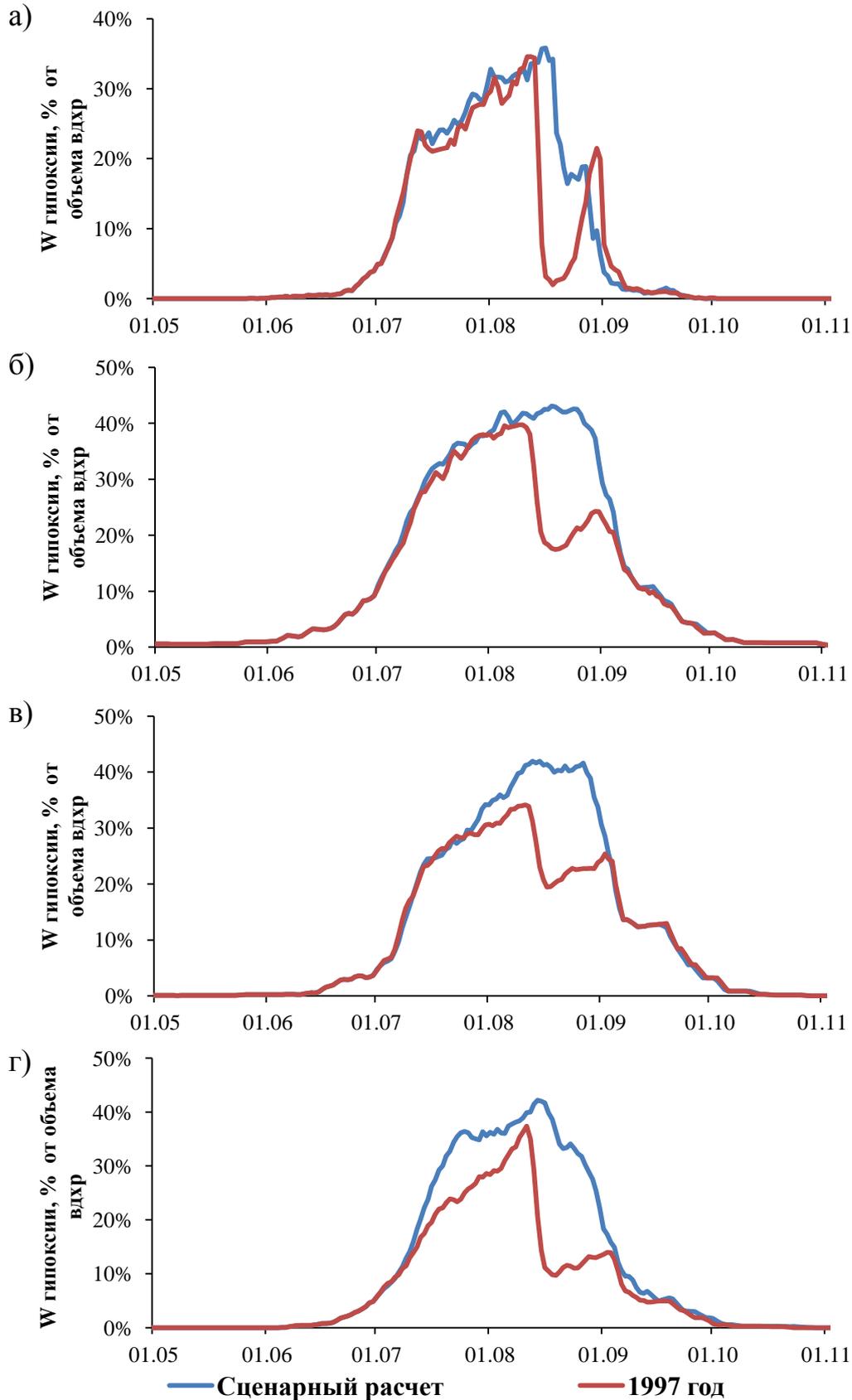


Рисунок 4.9 – Изменение объема зоны острой гипоксии (в % от объема всего водохранилища) с содержанием растворенного кислорода <2 мг/л по результатам диагностического и сценарного расчетов в Можайском (а), Рузском (б), Озернинском (в) и Истринском (г) водохранилищах

толщи воды растворенным кислородом и соответственно временному улучшению кислородных условий.

Сроки наихудших кислородных условий также претерпевают изменения (таблица 4.8): если по результатам диагностического расчета они приходились на начало второй декады августа, то при сценарном расчете максимальные объемы гипоксидных водных масс – в конце жаркого периода (15–16 августа).

Таблица 4.8 – Характеристики зон гипоксии и аноксии в водохранилищах Москворецкой водохозяйственной системы по результатам диагностического и сценарного модельных расчетов

Расчет	Объем водных масс с содержанием растворенного кислорода менее 6 мг/л, % от объема водохранилища	Объем водных масс с содержанием растворенного кислорода менее 2 мг/л, % от объема водохранилища	Объем водных масс с отсутствием растворенного кислорода, % от объема водохранилища	Объем водных масс с содержанием растворенного кислорода менее 6 мг/л, млн м ³	Объем водных масс с содержанием растворенного кислорода менее 2 мг/л, млн м ³	Объем водных масс с отсутствием растворенного кислорода, млн м ³	Дата максимального объема зоны гипоксии (менее 6 мг/л)	Дата максимального объема зоны гипоксии (менее 2 мг/л)	Дата максимального объема зоны аноксии (0 мг/л)	Период существования водных масс с содержанием O ₂ < 6 мг/л, сут	Период существования водных масс с содержанием O ₂ < 2 мг/л, сут	Период существования водных масс с отсутствием O ₂ , сут
Можайское водохранилище												
1997 год	56%	33%	15%	143	59	27	15.авг	11.авг	12.авг	131	101	70
Сценарий	58%	35%	16%	123	61	26	09.июл	01.авг	15.авг	134	106	78
Рузское водохранилище												
1997 год	52%	40%	24%	167	76	46	16.авг	05.авг	04.авг	133	117	85
Сценарий	58%	44%	32%	111	84	59	06.авг	06.авг	15.авг	138	121	90
Озернинское водохранилище												
1997 год	59%	35%	20%	68	40	23	11.авг	11.авг	11.авг	127	103	84
Сценарий	61%	41%	29%	74	49	30	30.июл	11.авг	27.авг	132	106	87
Истринское водохранилище												
1997 год	45%	26%	15%	89	58	33	13.авг	13.авг	13.авг	127	109	100
Сценарий	62%	43%	26%	95	65	40	11.авг	16.авг	16.авг	134	116	105

Несколько увеличивается продолжительность существования в водохранилищах бескислородных водных масс: в Можайском водохранилище – от 70 до 78 суток, в Рузском – от 85 до 90, в Озернинском от 84 до 87 и от 100 до 105 суток в Истринском водохранилище. Следовательно, при сходных

гидрометеорологических условиях сентября для полного разрушения гипоксидной и аноксидной водных масс потребуется больше времени после продолжительного жаркого периода, чем в среднее по погодным условиям лето, что связано с большей гидродинамической устойчивостью водной толщи.

Таким образом, модельными расчетами показано, что при наступлении устойчивой антициклональной погоды произойдет ощутимое ухудшение кислородных условий в водоемах: увеличится продолжительность существования в водохранилищах зон гипоксии, вырастет их доля в общем объеме, а наихудшие условия будут наблюдаться в конце жаркого периода.

4.3. Влияние уровенного режима водохранилищ Москворецкой водохозяйственной системы в летний период на кислородные условия

Возможность регулирования уровенного режима водохранилищ представляет собой эффективный способ воздействия на качество воды. Однако количественно оценить влияние режима работы гидроузла на качество воды при прочих равных условиях невозможно ввиду межгодовой изменчивости гидрометеорологических условий. Единственным инструментом, позволяющим выполнить такую количественную оценку, представляется математическое моделирование.

С целью изучения воздействия уровенного режима исследуемых водоемов на кислородные условия в них в летний период разработана и проведена серия сценарных модельных расчетов. В качестве информационной основы для сценариев выбраны три года, различающиеся по водности: маловодный 1975 год, средневодный 1997 год и многоводный 1990 год. В каждом сценарии на каждом из исследуемых водоемов в течение периода с 1 июня по 31 августа искусственно поддерживался стабильный уровень воды на отметках (в зависимости от сценария) от НПУ (183 м БС для Можайского, Рузского и Озернинского водохранилищ и 170 м БС для Истринского) до 1, 2, 3, 4, 5 и 6 м ниже НПУ.

В результате модельных расчетов получены средние и максимальные за летний период объемы зон острой гипоксии (с содержанием O_2 менее 2 мг/л) и аноксии (с полным отсутствием кислорода), также рассчитаны средние и максимальные значения индекса кислорода ИК. Сводные таблицы с полученными значениями перечисленных характеристик приводятся в приложении Е.

Объем гипоксидной водной массы и индекс кислорода ИК обнаружили тесную связь с уровнем воды в водохранилищах. При равных гидрометеорологических условиях с увеличением уровня возрастает толщина гиполимниона и его доля в общем объеме водохранилища, тогда как в эпилимнионе никаких изменений не происходит. Таким образом, при более высоком уровне в летний период окисляется большая часть детрита, чем при низком, ввиду больших запасов кислорода в гиполимнионе; однако к концу летнего периода это приводит к большей доле гипоксидной водной массы в общем объеме водохранилища.

Наиболее существенные изменения с ростом уровня происходят в маловодный год, когда малый приток кислорода с речными водами и антициклональная погода приводят к активизации потребления кислорода на дыхание и деструкцию, в результате чего при изменении уровня на 6 м происходит увеличение средней доли гипоксидной зоны в общем объеме на 50–100%. Так, для Можайского водохранилища при уровне 177 м БС средняя доля зоны гипоксии за летний период составляет 12%, а при НПУ возрастает до 24% (рисунок 4.10, рисунок 4.11). Чувствительна к изменениям уровня и величина ИК. Так, к примеру, среднее значение ИК в многоводный год в Рузском водохранилище при уровне 177 м составило 1,8 (трофический статус водоема может быть оценен как мезотрофный), а при НПУ – 3,3 (статус оценивается уже как эвтрофный). Такая же тенденция прослеживается и для Можайского водохранилища в многоводный и средневодный год. В маловодный год трофический статус обоих водохранилищ по величине ИК вне зависимости от поддерживаемого уровня определяется как эвтрофный.

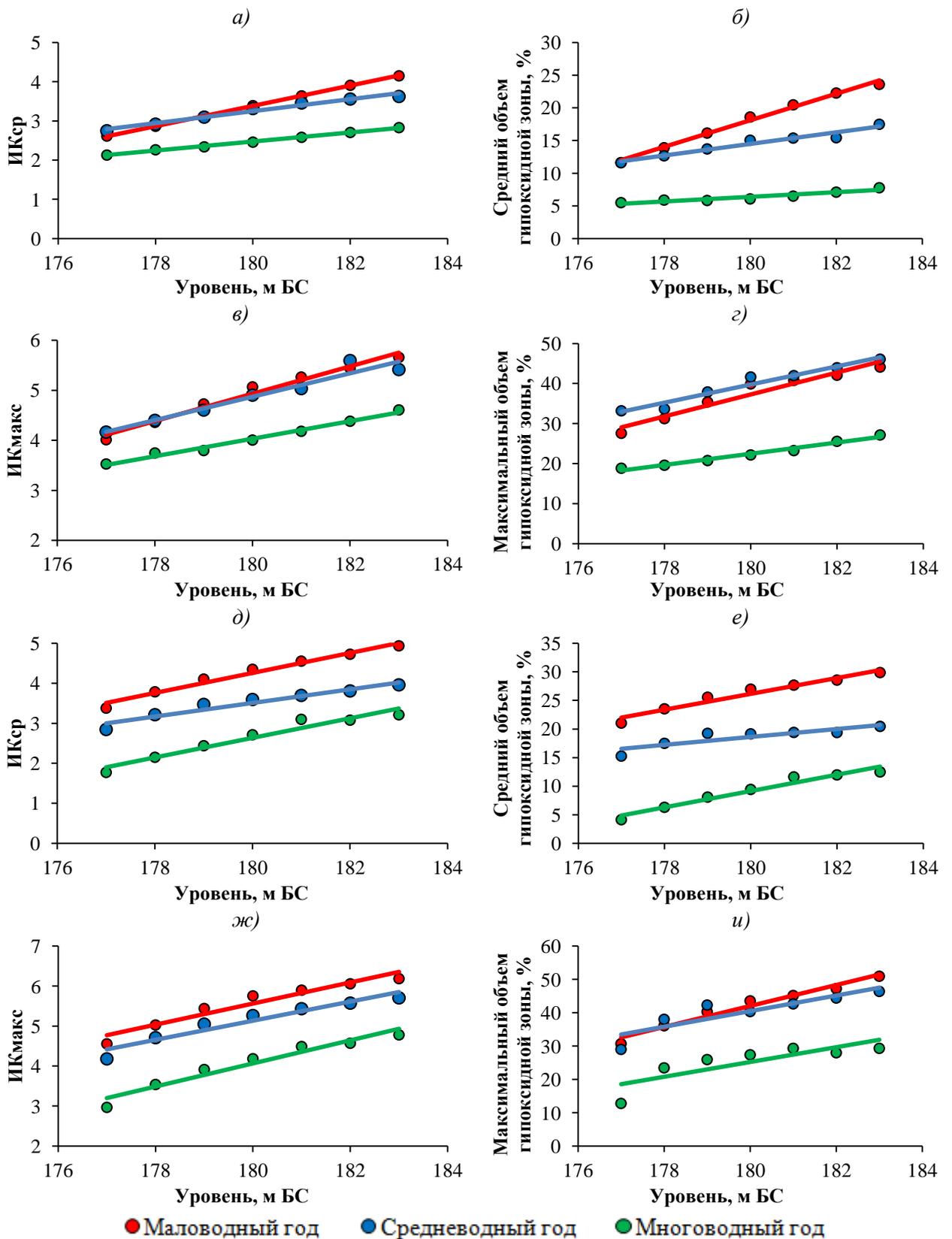


Рисунок 4.9. Изменение среднего (б, е) и максимального (г, з) объема зоны острой гипоксии (в % от объема всего водохранилища) с содержанием растворенного кислорода <math>< 2 \text{ мг/л}</math>, а также среднего (а, д) и максимального (в, ж) значений ИК по результатам сценарных расчетов в летний период в Можайском (а, б, в, г) и Ружском (д, е, ж, з) водохранилищах

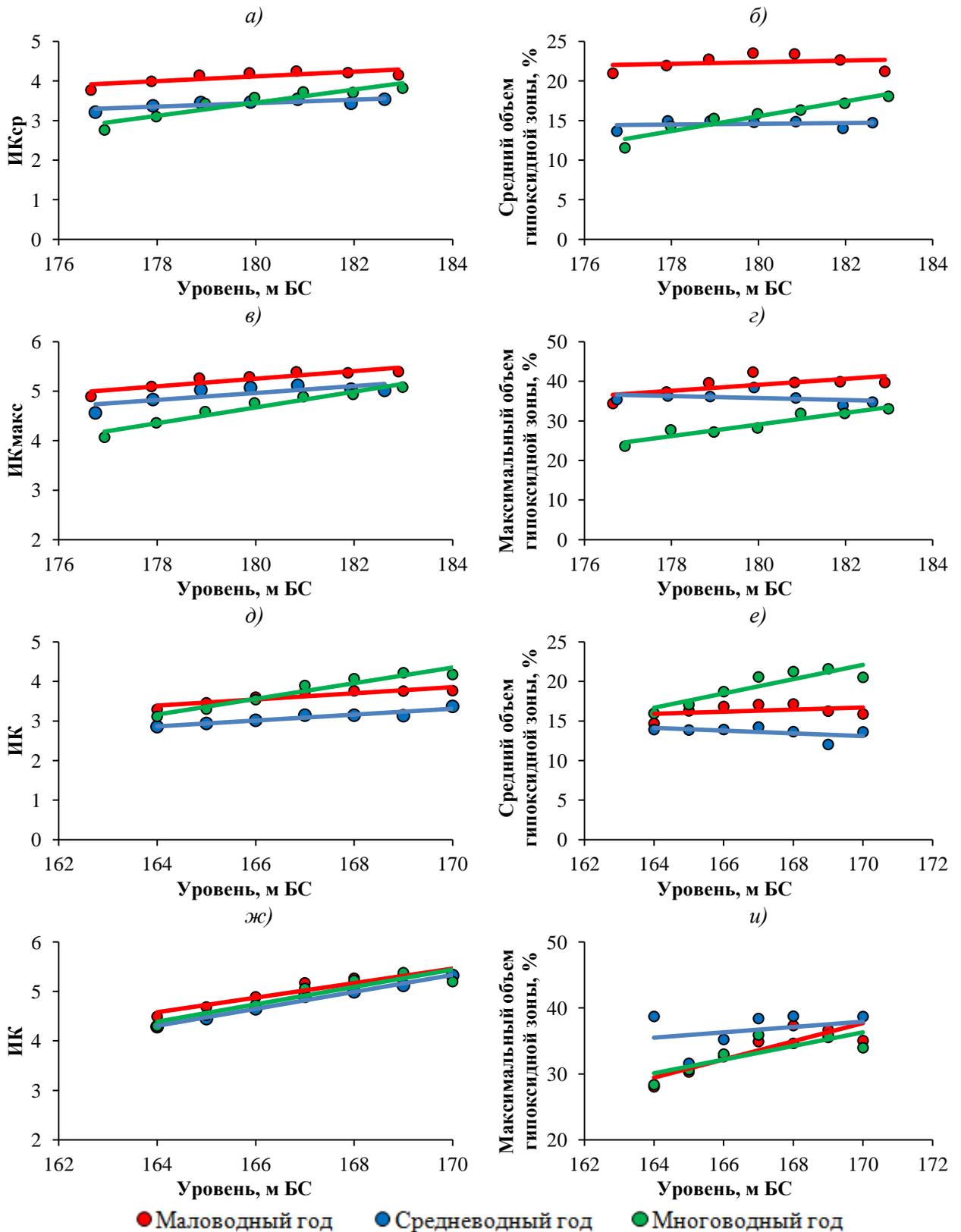


Рисунок 4.10. Изменение среднего (б, е) и максимального (г, и) объема зоны острой гипоксии (в % от объема всего водохранилища) с содержанием растворенного кислорода <2 мг/л, а также среднего (а, д) и максимального (в, ж) значений ИК по результатам сценарных расчетов в летний период в Озернинском (а, б, в, г) и Истринском (д, е, ж, и) водохранилищах

Всё вышесказанное справедливо для узких глубоководных простых по форме Рузского и Можайского водохранилищ. Совершенно иная картина выявлена для Озернинского и Истринского водохранилищ. В этих водоемах доля объема гипоксидной зоны слабо зависит от изменений уровня воды. Увеличение средней за лето доли гипоксидной зоны в общем объеме воды с ростом уровня в обоих водоемах происходит только в многоводный год, тогда как в маловодный и средневодный годы эта доля не изменяется. При этом в Озернинском водохранилище максимальный объем гипоксидной зоны наблюдается в маловодный год и составляет в среднем 23%, в Истринском максимальные значения отмечены в многоводный год и также достигают 23% – это меньше, чем максимумы, отмеченные в Рузском и Можайском водохранилищах.

Полученные результаты связаны с морфометрическими особенностями Озернинского и Истринского водохранилищ: их сложной многолопастной структурой, а также меньшей относительной глубоководностью. С этим же связана и меньшая доля гипоксидной водной массы в объеме этих водоемах. Боковые лопасти в них достаточно мелководны и потому легко подвергаются ветровому перемешиванию, вследствие чего бескислородные условия там не возникают вовсе или развиваются только в придонном слое.

Таким образом, проведенные расчеты наиболее четко показали различия кислородных условий между исследуемыми водоемами. Полученные графики для Можайского и Рузского водохранилищ могут использоваться при регулировании стока гидроузлами с целью улучшения кислородных условий в водоемах и предотвращения в них заморных явлений в летний период.

Выводы

Проведено исследование структуры кислородного баланса Москворецких водохранилищ в летний и зимний периоды. Модельными расчетами показано доминирование фотосинтеза в приходной части баланса, составляющее до 98%.

В расходной части наиболее велик вклад дыхания фитопланктона, эвазии и затрат на окисление ОВ.

Структура баланса РК практически не зависит от водности года и в различных водохранилищах московской системы сохраняется неизменной.

Рассмотрением баланса кислорода по районам водохранилищ показано, что вклад течений в поступление кислорода в отдельные районы сопоставим с процессом фотосинтеза. В летний период большие объемы воды переносятся дрейфовыми течениями, их вклад может достигать 30–40% от приходной или расходной части кислородного баланса района.

Проведены количественные оценки переноса кислорода плотностными течениями. Установлено, что в период существования стратификации водной толщи с этим видом течений происходит поступление кислорода, растворенного в речных водах, в гипolimнион центрального и приплотинного районов, где в летний период отмечается резкий дефицит кислорода.

В период ледостава структура баланса РК главным образом определяется режимом регулирования гидроузла. Единственной составляющей приходной части в балансе в это время являются речные воды. В расходной части до половины от общих затрат РК составляют сбросы в нижний бьеф, значительное количество кислорода расходуется на окисление ОВ, а также потребляется грунтами дна. Расчетами показано, что к моменту начала нового водохозяйственного года запасы кислорода в водохранилищах сокращаются почти в 2 раза.

Расчетами установлено, что гипоксидная водная масса в водохранилищах московской системы начинает формироваться в конце мая – начале июня. Интенсивность увеличения её объема определяется типом погоды: при сохранении безветренной жаркой погоды длительное время запасы кислорода в гипolimнионе активно расходуются на окисление ОВ и дыхание гидробионтов, ввиду чего стремительно увеличивается объем гипоксидной и аноксидной водных масс, а также увеличивается продолжительность их существования.

Наиболее глубокие дефициты кислорода наблюдаются в маловодный год в узких и глубоких Можайском и Рузском водохранилищах. С увеличением водности года улучшаются кислородные условия в водохранилищах в вегетационный период.

Существенное влияние на кислородный режим оказывает режим уровня воды Можайского и Рузского водохранилищ в вегетационный период. В этих водохранилищах при увеличении уровня увеличивается объем водной массы с резким дефицитом кислорода. В морфометрически более сложных Озернинском и Истринском водохранилищах повышение уровня при прочих равных условиях не приводит к ухудшению кислородных условий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучение кислородного режима водоемов и факторов, его обуславливающих, – задача чрезвычайно актуальная. Недостаток кислорода приводит к возникновению заморных явлений, резко снижает способность водоемов к самоочищению, ввиду чего прогнозирование данного явления имеет высокую ценность для своевременного проведения комплекса мероприятий, направленных на предотвращение массовой гибели рыб и улучшение качества воды. В свою очередь, изучение кислородного режима и его моделирование невозможно без изучения всего комплекса химико-биологических взаимодействий, происходящих в водных экосистемах.

Целью настоящей работы являлся анализ и количественная оценка комплекса факторов, определяющих формирование кислородного режима водохранилищ Москворецкой водной системы, на основе полевых наблюдений и математического моделирования.

Проведенное исследование позволило подробно рассмотреть кислородные условия в четырех базовых водохранилищах Москворецкой водохозяйственной системы. Было установлено, что относительная глубоководность и замедленный водообмен Москворецких водохранилищ, способствующие развитию в летний период плотностной стратификации водной толщи, обуславливают ежегодное формирование обширной бескислородной зоны в их придонных слоях, которая к концу лета может занимать весь гипolimнион. При неблагоприятном сочетании гидрометеорологических факторов в водоемах происходит массовая гибель рыб вследствие истощения запасов кислорода.

Обобщение данных наблюдений за содержанием кислорода в исследуемых объектах почти за полувековой период их существования выявило существенное ухудшение кислородных условий в летнее время в последние 35 лет, выразившееся главным образом в увеличении объема гипоксидной водной массы.

Однако следует признать, что наиболее эффективный инструмент для исследования кислородного режима, формирования зон пересыщения и недостатка кислорода – это математическое моделирование. Анализ наблюдений не позволяет рассмотреть воздействие отдельных факторов на кислородные условия, тогда как при использовании настроенной и верифицированной модели это становится возможным.

Именно сочетание методов математического моделирования с режимными и экспериментальными полевыми наблюдениями позволило детально изучить режим растворенного кислорода в водохранилищах Москворецкой системы водоснабжения г. Москвы и выявить закономерности его формирования.

К основным результатам работы относятся следующие положения:

1) Проведены расчеты интегральных показателей кислородного режима (запасов растворенного кислорода, объемов зон с острой гипоксией, индексов кислорода (ИК)) по данным наблюдений, проанализированы изменения этих показателей и их связь с параметрами устойчивости водной толщи. Полученные тесные связи индекса кислорода с величиной стабильности водной толщи S_t и объемом гипоксидной зоны, а также с содержанием хлорофилла «а», являющимся показателем продуктивности водоемов, обосновывают эффективность его применения для сравнения кислородного режима водоемов между собой.

2) Верификация кислородного блока модели ГМВ-МГУ, учет в его алгоритме процесса поглощения кислорода донными отложениями, проведение серии калибровочных, а также подробных валидационных расчетов режима растворенного кислорода на независимом материале во всех исследуемых водоемах в различающиеся по гидрометеорологическим условиям и режиму работы гидроузла годы наглядно показывают высокое качество воспроизведения кислородного режима гидрологической моделью водохранилища и обосновывают её применение в качестве инструмента исследования пространственно-временных полей растворенного кислорода.

3) При помощи диагностических модельных расчетов получены количественные оценки вклада различных составляющих в структуру кислородного баланса в разных районах водохранилищ в зимний и летний период, оценена роль внутриводоемных течений в переносе кислорода между районами, а также вклад химико-биологических процессов в поступление и отток кислорода из водохранилищ. Показано, что в периоды стратифицированности водной толщи внутриводоемные течения вносят значительный вклад в перенос кислорода внутри водоемов. Особенно важен этот процесс в зимний период.

4) По результатам расчетов подробно рассмотрены условия формирования гипоксии и развития бескислородных условий в летний период, показаны их различия между водохранилищами, а также влияние водности и погодных условий на эти процессы. Наихудшие кислородные условия формируются в маловодные годы в узких и глубоких Можайском и Рузском водохранилищах. Различия максимальных объемов гипоксидной и аноксидной зон в зависимости от водности года значительно варьируют. Установлено, что при увеличении длительности летнего периода жаркой погоды происходит увеличение продолжительности существования в водоемах бескислородных условий и значительно возрастают скорости истощения запасов кислорода в гипolimнионе водохранилищ.

5) Проведенная модельная оценка воздействия уровенного режима в летний период на объем зоны острой гипоксии в водохранилищах показала, что в Можайском и Рузском водохранилищах происходит существенное увеличение объема гипоксидной водной массы с ростом уровня, что связано с увеличением доли гипolimниона в общем объеме водохранилищ. В то же время в более мелководных и морфометрически сложных Озернинском и Истринском водохранилищах подобных изменений в кислородных условиях не выявлено.

ЛИТЕРАТУРА

Александрова З.В., Ромова М.Г. Роль грунтов в формировании придонного дефицита кислорода в Азовском море // В кн. Вопросы биогеографии Азовского моря и его бассейна. Л.: ГО СССР, 1977. С. 80–84.

Алимов А.Ф. Введение в продукционную гидробиологию. Л.: Гидрометеиздат, 1989. 151 с.

Астраханцев Г.П., Меншуткин В.В., Писулин И.В., Руховец Л.А. Математическая модель для исследования реакции экосистемы Ладожского озера на изменение антропогенной нагрузки (препринт). СПб.: СПбНЦ РАН, 1992. 44 с.

Бердавцева Л.Б., Лебедев Ю.М., Мальцман Т.С. Трансформация органического вещества в Можайском водохранилище // В кн. Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 1. М.: МГУ, 1971. С. 149–162.

Бреховских В.Ф. Гидрофизические факторы формирования кислородного режима водоемов. М.: Наука, 1988. 168 с.

Быковский В.И. Движение водных потоков и фитопланктона // Гидробиология, 1978. Т. 14. № 2. С. 40–47.

Взаимодействие между водой и седиментами в озерах и водохранилищах. Л.: Наука, 1984. 272 с.

Винберг Г.Г. Зависимость энергетического обмена от массы тела у водных пойкилотермных животных // Журнал общ. биологии, 1976. Т. 37. № 1. С. 56–59.

Водохранилища Верхней Волги. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 291 с.

Водохранилища Москворецкой водной системы. М.: МГУ, 1985. 266 с.

Гончаров А.В., Абдуллаева К.М. Особенности фитопланктона Москворецких водохранилищ в связи с их глубоководностью и изменением уровня воды // Ученые записки РГГМУ, 2014. № 34. С. 128–134.

Гутельмахер Б.Л. Метаболизм планктона как единого целого. Л.: Наука, 1986. 153 с.

Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.

Даценко Ю.С., Ветрова Е.И. Оценка трофического состояния озер умеренной зоны по характеристикам их кислородного режима // Вестник Моск. ун-та. Серия 5. География, 2006. № 1. С. 36–38.

Даценко Ю.С., Ерина О.Н., Пуклаков В.В. Моделирование развития фитопланктона в Рыбинском водохранилище // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2015. № 1. С. 32–40.

Даценко Ю.С., Ерина О.Н., Пуклаков В.В. Моделирование режима фосфора в стратифицированном водохранилище // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Материалы V Всерос. симп. с междунар. уч. Петрозаводск: КНЦ РАН, 2012. С. 379–382.

Даценко Ю.С., Ерина О.Н., Пуклаков В.В., Соколов Д.И. Оценка возможности моделирования режима экологически значимых характеристик качества воды водохранилищ Московского региона // Сб. трудов II открытой конф. Науч.-обр. центра «Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление». М.: ИВП РАН, 2012. С. 107–118.

Денисова А.И., Нахшина Е.П., Новиков Б.И., Рябов В.К. Донные отложения водохранилищ и их влияние на качество воды. Киев: Наук. Думка, 1987. 164 с.

Дзюбан А.Н. Определение деструкции органического вещества в донных отложениях водоемов // Гидробиол. журнал, 1987. Т. 23. № 2. С. 30–35.

Ершова М.Г., Немальцев А.С., Пуклаков В.В., Сахарова М.И. Гидроэкологическое состояние водохранилищ Подмосковья // В кн. Проблемы гидрологии и гидроэкологии. М.: МГУ, 1999. Вып. 1. С. 282–301.

Зиновьев А.Т. Математическое моделирование гидрологических процессов в водохранилищах и нижних бьефах ГЭС на реках Сибири. Дис. д-ра техн. наук. Барнаул, 2014. 332 с.

Иванова М.Б. Продукция планктонных ракообразных в пресных водах. Л.: Наука и техника, 1985. 220 с.

Иваньковское водохранилище и его жизнь. Л.: Наука, 1978. 304 с.

ИСО 5813-83. Качество воды. Определение содержания растворенного кислорода. Йодометрический метод.

ИСО 5814-84. Качество воды. Определение содержания растворенного кислорода. Электрохимический метод с применением зонда.

Йоргенсен С.Э. Управление озерными экосистемами. М.: Агропромиздат, 1985. 160 с.

Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 3. Можайское водохранилище. М: МГУ, 1979. 400 с.

Кузнецов С.И., Карзинкин Г.С. Новые методы в лимнологии // Тр. Лимнологической станции в Косине, 1932. Вып. 13–14. С. 47–67.

Куслап П.Т., Эннет П.О. Потребление кислорода донными отложениями в системе «вода – донные отложения» // Антропогенное эвтрофирование природных вод. Тез. докл. на III Всесоюз. Симпоз. Черноголовка, 1983. С. 83–85.

Леонов А.В. Моделирование природных процессов на основе имитационной гидроэкологической модели трансформации соединений С, N, P, Si: учебное пособие. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2008. 168 с.

Леонов А.В., Литвинов А.С., Разгулин С.М. Анализ особенностей функционирования экосистемы Рыбинского водохранилища // Водные ресурсы, 1996. Т. 23. № 6. С. 739–753.

Леонов А.В., Осташенко М.М., Лаптева Е.Н. Математическое моделирование процессов трансформации органического вещества и соединений биогенных элементов в водной среде: предварительный анализ условий функционирования экосистемы Ладожского озера // Водные ресурсы, 1991. Т. 18. № 1. С. 51–72.

Ломова Д.В. Потребление кислорода донными отложениями водохранилища долинного типа. Дисс. канд. геогр. наук. М.: МГУ, 1995. 102 с.

Ляхин Ю.И. О скорости обмена кислородом между океаном и атмосферой // Океанология, 1978. Т. 18. Вып. 6. С. 1014–1021.

Мартынова М.В. Азот и фосфор в донных отложениях озер и водохранилищ. М.: Наука, 1984. 160 с.

Мартынова М.В., Жукова Т.В., Жуков Э.П. Донные отложения в системе Нарочанских озер. 2. Потребление кислорода // Водные ресурсы, 1991. № 2. С. 123–134.

Меншуткин В.В. Имитационное моделирование водных экологических систем. СПб.: Наука, 1993. 160 с.

Меншуткин В.В. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск–СПб.: КНЦ РАН, 2010. 419 с.

Меншуткин В.В., Воробьева О.Н. Модели экосистемы Ладожского озера // В кн. Современное состояние экосистемы Ладожского озера. Л.: Наука, 1987. С. 187–200.

Мизандронцев И.Б. Химические процессы в донных отложениях водоемов. Новосибирск: Наука, 1990. 175 с.

Мизандронцев И.Б., Мизандронцева К.Н. Газообмен между водной средой и атмосферой на примере Байкала // Водные ресурсы, 1995. Т. 22. № 4. С. 439–445.

Моделирование режима фосфора в долинном водохранилище. М.: МГУ, 1995. 80 с.

Моделирование экосистем больших стратифицированных озер. СПб.: Наука, 2003. 363 с.

Невская губа – опыт моделирования. СПб.: Vorey Print, 1997. 375 с.

Несмеянов С.А. Донные отложения и кислородный режим водоемов. М.: АМН СССР, 1950. 157 с.

Новиков Б.И. Некоторые данные о влиянии ветрового режима на распределение синезеленых водорослей в водохранилищах Днепра // Информ. бюл. ИБВВ, 1978. № 40. С. 54–57.

Одум Ю. Основы экологии. М.: Мир, 1975. 740 с.

Оксинок О.П. Фитопланктон водоснабжающих каналов // Гидробиол. журнал, 1971. Т. 7. С. 27–38.

Оксиюк О.П., Тимченко В.М., Якушин В.М., Линник П.Н. Кислородный баланс Киевского водохранилища в зимний период // Гидробиол. журнал, 2001. № 3. С 10–17.

Орлеанская О.Б. Зимний фитопланктон Можайского водохранилища // В кн. Комплексные исследования водохранилищ. Вып. 4. М.: МГУ, 1978. С. 189–191.

Приймаченко А.Д., Литвинова М.А. Распределение и динамика синезеленых водорослей в Днепровских водохранилищах // В кн. «Цветение» воды. Киев: Наук. думка, 1968. С. 42–66.

Приказ Федерального агентства по рыболовству от 18 января 2010 г. № 20 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» // Российская газета, № 46, 05.03.2010.

Пуклаков В.В. Гидрологическая модель водохранилища: руководство для пользователей. М.: ГЕОС, 1999. 96 с.

Пуклаков В.В. Роль плотностных течений во внутреннем водообмене водохранилища // Водные ресурсы, 1999. Т. 26. № 2. С. 161–169.

Пуклаков В.В., Пуклакова Н.Г. Оценка связи электропроводности и расхода воды в притоках Можайского водохранилища // Теоретические и прикладные проблемы лимнологии: Материалы междунар. науч.-практ. конф. Минск, 2003. С. 228–229.

Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К. Расчеты плотностных течений в Можайском водохранилище // Метеорология и гидрология, 2001. Т. 26. № 5. С. 94–104.

Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К., Кременецкая Е.Р., Гашкина Н.А. Самоочищение вод Можайского водохранилища зимой // Водные ресурсы, 2002. Т. 29. № 6. С. 711–720.

Пырина И.Л., Елизарова В.А. Спектрофотометрическое определение хлорофиллов в культуре некоторых водорослей // Труды ИБВВ, 1971. Вып. 21. С. 5–66.

РД 52.24.419-2005. Массовая концентрация растворенного кислорода в водах. Методика выполнения измерений йодометрическим методом.

Рекомендации по использованию автоматизированных систем регистрации содержания растворенного кислорода, рН, температуры воды и подводной освещенности при изучении продукционно-деструкционных процессов. М.: ВНИРО, 1980. 68 с.

Ризниченко Г.Ю., Рубин А.Б. Математические модели биологических продукционных процессов. М.: МГУ, 1993. 302 с.

Романенко В.И., Романенко В.А. Деструкция органического вещества в иловых отложениях Рыбинского водохранилища // Труды ИБВВ, 1969. Вып. 19(22). С. 24–31.

Романова Е.П. Роль зоопланктона в минерализации органического вещества в воды разной водности // Водные ресурсы, 1993. Т. 20. № 6. С. 736–743.

Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоемов и перспективных для промысла районов Мирового океана. М.: ВНИРО, 2003. 202 с.

Савенко В.С. Химия водного поверхностного микрослоя. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 184 с.

Самойленко В.Н. Режим кислорода водных объектов устьевой области р. Днепра в условиях зарегулирования водного стока. Автореф. дис. канд. геогр. наук. Ростов-на-Дону, 1992. 28 с.

Сахарова М.И., Соколова Н.Ю., Эдельштейн К.К. Многолетние изменения структуры сообществ в Можайском водохранилище и некоторые мероприятия по снижению темпов эвтрофирования // Биологические науки, 1993. № 1. С. 66–73.

Сорокин Ю.И. Роль хемосинтеза и продукции органического вещества в водоемах // Микробиология, 1957. Т. 26. Вып. 6. С. 736–744.

Страхов Н.Н. Основы теории литогенеза. Т. 2. М.: Наука, 1962. 574 с.

Страшкраба М., Гнаука А. Математическое моделирование пресноводных экосистем. М.: Мир, 1989. 373 с.

Термодинамические процессы в глубоких озерах. Л.: Наука, 1981. 222 с.

Унифицированные методы анализа вод СССР, вып. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1978. 144 с.

Хатчинсон Д. Лимнология. М.: Прогресс, 1969. 592 с.

Цыцарин Г.В. Введение в гидрохимию. М.: МГУ, 1988. 104 с.

Чернякова А.М., Салливан Д.П., Стунжас П.А., Налбандов Ю.Р., Поярков С.Г., Калвайтис А.Н., Соломон Д.Л. О сопоставлении определений растворенного в воде кислорода по методу Винклера // Океанология, 1983. Т. 23. № 4. С. 681–687.

Щербак В.И. Фотосинтетическая активность доминирующих видов Днепровского фитопланктона // Гидробиол. журнал, 1998. Т. 4. № 5. С. 11–21.

Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.

Эдельштейн К.К. Гидрология озер и водохранилищ. М.: Перо, 2014. 399 с.

Эдельштейн К.К. Лимнологическая практика. Методические указания. М.: МГУ, 1972. 157 с.

Эдельштейн К.К., Гречушникова М.Г., Даценко Ю.С., Пуклаков В.В. Диагностическое моделирование внутриводоемных процессов в водохранилищах // Водные ресурсы, 2012. № 4. С. 437–451.

Эдельштейн К.К., Жидырева Л.Е., Новикова Е.В. Современное состояние озер Южного Урала // Матер. Всесоюзного совещания «Антропогенные изменения экосистем малых озер». Л., 1991. С. 151–154.

Эдельштейн К.К., Пуклаков В.В. Управление качеством воды в стратифицированном водохранилище: оценка с помощью математического моделирования // Водные ресурсы, 1996. Т. 23. № 4. С. 489–499.

Aberg B., Rodhe W. Uberdie Mileufaktoren in einigen sud-Shwedischen Seen // *Simb. Bot. Upsal.*, 1942. Vol. 5. № 3. Pp. 1–256.

Adeney W.E., Becker H.G. The determination of the rate of solution of atmospheric nitrogen and oxygen by water // *Phil. Mag.*, 1919. Vol. 38. № 228. Pp. 317–337.

Brucea L.C., Hamilton D., Imbergera J., Galc G., Gophend M., Zoharyc T., Hambrichte K.D. A numerical simulation of the role of zooplankton in C, N and P cycling in Lake Kinneret, Israel // *Ecological Modelling*, 2006. Vol. 193. Issues 3–4. Pp. 412–436.

Carrit D.E., Carpenter J.H. Comparison and evaluation of currently employed modifications of the Winkler method for determining dissolved oxygen in seawater. A NASCO report // *J. Mar. Res.*, 1966. Vol. 24. № 3. Pp. 286–313.

CE-QUAL-R1: A numerical one-dimensional model of reservoir water quality; User's Manual (Revised Edition). Vicksburg, MS: U. S. Army Corps of Engineers, 1995. 522 p.

Chapra S.C. Surface water-quality modeling. Long Grove, Illinois: Waveland press, 2008. 844 p.

Chiaro P.S., Burke D.A. Sediment oxygen demand and nutrient release // *J. Environ. Eng. Div. Proc ASCE*, 1980. Vol. 106, № 1, Pp. 117–195.

Codispoti L.A. On the determination of dissolved oxygen in sea water // In: Friederich G.E., Codispoti L.A., Sakamoto C.M. An easy-to-construct automated Winkler titration system. MBARI Technical report No 91-6, 1991.

Cole T.M., Wells S.A. CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, hydrodynamic and water quality model, version 3.71. User manual. Portland, OR: PSU, 2013. 792 p.

Culberson C.H. Dissolved oxygen // In: WOCE operations manual. Vol. 3. The operational programme. Sect. 3.1. WOCE hydrographic programme. Pt. 3.1.3. WHP operations and methods. Woods Hole, Mass.: WOCE, 1994.

De With R., Van Gemergen H. Growth and metabolism of the purple sulfur bacterium *Thiocapsa roseopersicina* under combined light/dark and oxi/anoxic regimes // *Arch. Microbiol.*, 1990. Vol. 154. Pp. 459–464.

Deus R., Brito D., Mateus M., Kenov I., Fornaro A., Neves R., Alves C.N. Impact evaluation of a pisciculture in the Tucuruí reservoir (Pará, Brazil) using a two-dimensional water quality model // *Journal of Hydrology*, 2013. Vol. 487. Pp. 1–12.

Development of Delft3D-ECO. Calibration for a tropical stratified reservoir. Delft: Delft Hydraulics, 2007. 75 p.

D-Water Quality. User manual. Delft: Deltares systems, 2014. 414 p.

Edberg N, Hafsten B. Oxygen uptake of bottom sediments studied in situ and in laboratory // *Water Research*, 1973. Vol. 7. № 9. Pp. 1285–1294.

Edwards R.W., Rolley H.L.J. Oxygen consumption of river muds // *J. Ecol.*, 1965. Vol. 53. № 1. Pp. 1–19.

Erichsen A.C., Møhlenberg F., Closter R.M., Sandberg J. Models for transport and fate of carbon, nutrients and radionuclides in the aquatic ecosystem at Öregrundsgrepen. Stockholm: SKB, 2010. 89 p.

Fang X., Stefan H.G. Simulations of climate effects on water temperature, dissolved oxygen, and ice and snow covers in lakes of the contiguous United States under past and future climate scenarios // *Limnol. Oceanogr.*, 2009, Vol. 54. Pp. 2359–2370.

Filho M.C.A., De Jesus J.A.O., Branski J.M., Hernandez J.A.M. Mathematical modelling for reservoir water-quality management through hydraulic structures: a case study // *Ecological Modelling*, 1990. Vol. 52. Pp. 73–85.

Golosov S., Maher O.A., Schipunova E., Terzhevik A., Zdrovennova G., Kirillin G. Physical background of the development of oxygen depletion in ice-covered lakes // *Oecologia*, 2007. Vol. 151. Pp. 331–340.

Graneli W. The influence of *Chrinormus plumosus* larvae on the oxygen uptake of sediment // *Arch. Hydrobiol.*, 1979. Vol. 87. № 4. Pp. 358–403.

Grote A. Der Sauerstoffhaushalt der Seen. Stuttgart: E. Schweizerbart, 1934. 217 p.

Gunduz O., Soyupak S., Yurteri C. Development of water quality management strategies for the proposed Isikli Reservoir // *Water Science and Technology*, 1998. Vol. 37. Issue 2. Pp. 369–376.

Haffner G.D., Harris G.P., Jarai M.K. Physical variability and plankton communities. III. Vertical structure in phytoplankton populations // *Arch. Hydrobiol.*, 1980. Vol. 89. № 3. Pp. 363–381.

Harris G.P., Haffner C.D., Piccinin B.B. Physical variability and phytoplankton communities. II. Primary productivity by phytoplankton in a physically variable environment // *Arch. Hydrobiol.*, 1980. Vol. 88. № 4. Pp. 393–425.

Hartwing E.O. Factors affecting respiration and photosynthesis by the benthic community of a subtidal siliceous sediment // *Mar. Biol.*, 1978. Vol. 46. № 3. Pp. 283–293.

Hill J., Porcella D.B. Component Description of Sediment-Water Microcosms. Logan, Utah: Utah State University, 1974. 417 p.

Hipsey M.R., Antenucci J.P., Hamilton D. Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model: CAEDYM v3.2. Science Manual (DRAFT). Perth: UWA, 2015. 119 p.

Hodges B., Dallimore C. Estuary, Lake and Coastal Ocean Model: ELCOM v2.2. Science Manual. Perth: UWA, 2015. 62 p.

Hondzo M., Stefan H. Long-term lake water quality predictors // *Water Research*, 1996. Vol. 30. № 12. Pp. 2835–2852.

Imberger J., Patterson J.C. Physical Limnology // *Advances in Applied Mechanics*, 1990. Vol. 27. Pp. 303–476.

Imerito A. Dynamic Reservoir Simulation Model DYRESM v4.0. Science Manual. Perth: UWA, 2015. 47 p.

Jongeling T., Zijl F., Hulsbergen R. Water Quality Model of Gatun Lake for Expanded Panama Canal. Final Report. Delft: Delft Hydraulics, 2009. 214 p.

Kaçıkoç M., Beyhan M. Hydrodynamic and Water Quality Modeling of Lake Eğirdir // *Clean – Soil, Air, Water*, 2014. Vol. 42. Issue 11. Pp. 1573–1582.

Kara E.L., Hanson P., Hamilton D., Hipsey M.R., McMahon K.D., Read J.S., Winslow L., Dedrick J., Rose K., Carey C.C., Bertilsson S., da Motta Marques D., Beversdorf L., Miller T., Wu C., Hsieh Y.-F., Gaiser E., Kratz T. Time-scale dependence in numerical simulations: Assessment of physical, chemical, and biological predictions in a stratified lake at temporal scales of hours to months // *Environmental Modelling & Software*, 2012. Vol. 35. Pp. 104–121.

Keeyask Generating Project. Environmental Impact Statement. Surface Water Temperature and Dissolved Oxygen. Winnipeg, MB: KHL P, 2012. 89 p.

Kristensen E. Oxygen and inorganic nitrogen exchange in a *Neveis virens* (Polichaeta) bioturbated sediment-water system // *J. of Coastal Res.*, 1985. Vol. 1. № 2. Pp. 109–116.

Kuo J.-T., Lung W.-S., Yang C.-P., Liu W.-C., Yang M.-D., Tang T.-S. Eutrophication modelling of reservoirs in Taiwan // *Environmental Modelling & Software*, 2006. Vol. 21. Issue 6. Pp. 829–844.

Lake Simcoe hydrodynamic and water quality model. Oakville, Ontario: Baird & Associates, 2006. 210 p.

Leon L.F., Smith R.E.H., Romero J.R., Hecky R.E. Lake Erie Hypoxia Simulations with ELCOM-CAEDYM // In: *Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting: Summit on Environmental Modelling and Software*. International Environmental Modelling and Software Society. Burlington, Vermont, 2006. CD ROM.

Lindeloom H.J., Sanda A.J. A new bell jar/microelectrode method to measure changing oxygen fluxes in illuminated sediments with a microalgal cover // *Limnol. Oceanogr.*, 1985. Vol. 30. № 3. Pp. 693–698.

Lindim C. Modelling of water quality in the Alqueva Reservoir. PhD Thesis. Portugal, 2011. 189 p.

Marcé R., Moreno-Ostos E., García-Barcina J.M., Armengol J. Tailoring dam structures to water quality predictions in new reservoir projects: Assisting decision-

making using numerical modeling // *Journal of Environmental Management*, 2010. Vol. 91. Issue 6. Pp. 1255–1267.

Martin D.C., Bella D.A. Effect of mixing of oxygen uptake rate of estuarine bottom deposits // *J. Water Pollut. Contr. Fed.*, 1971. Vol. 43. № 9. Pp. 1865–1876.

Martinsa G., Ribeiro D.C., Pacheco D., Cruz J.V., R. Cunha R., Gonçalves V., Nogueira R., Brito A.G. Prospective scenarios for water quality and ecological status in Lake Sete Cidades (Portugal): The integration of mathematical modelling in decision processes // *Applied Geochemistry*, 2008. Vol. 23. Issue 8. Pp. 2171–2181.

MIKE by DHI. ECOLAB. Water quality templates. Scientific Description. Copenhagen: DHI, 2010. 28 p.

Modelling of the Nam Theun 2 Reservoir Water quality and greenhouse gases emissions. Delft: Delft Hydraulics, 2009. 205 p.

Ondok J.P., Pokorny J. Model of diurnal regime of DO and CO in stands of submergent aquatic vegetation // *Ekologia (CSSR)*, 1982. Vol. 1. № 4. Pp. 381–394.

Ostfeld A., Salomons S.. A hybrid genetic-instance based learning algorithm for CE-QUAL-W2 calibration // *Journal of Hydrology*, 2005. Vol. 310. Issues 1–4. Pp. 122–142.

Park Y., Cho K.H., Kang J.-H., Lee S.W., Kim J.H. Developing a flow control strategy to reduce nutrient load in a reclaimed multi-reservoir system using a 2D hydrodynamic and water quality model // *Science of The Total Environment*, 2014. Vol. 466–467. Pp. 871–880.

Pen M.A., Katsev S., Oguz T., Gilbert D. Modeling dissolved oxygen dynamics and hypoxia // *Biogeosciences*, 2010. Vol. 7. Pp. 933–957.

Porcella D.B., Petersen S.A., Larsen D.P. Proposed method for evaluating the effects of restoring lakes // In: *Limnological and Socioeconomical Evaluation of Lake Restoration Projects: Approaches and Preliminary Results*. Washington, DC: U.S. Environ. Prot. Agency, 1979. Pp. 265–310.

Preparation of a Preliminary Lake Victoria Physical Processes and Water Quality Model. Final Report. Delft: Delft Hydraulics, 1999. 116 p.

Puklakov V. Mathematical Model of the Heat and Mass Transfer Processes in a Stratified Reservoir // *Int. Revue ges. Hydrobiol.*, 1995. Vol. 80. № 1. Pp. 49–59.

Rasmussen E.K., Svenstrup Petersen O., Thompson J.R., Flower R.J., Ahmed M.H. Hydrodynamic-ecological model analyses of the water quality of Lake Manzala (Nile Delta, Northern Egypt) // *Hydrobiologia*, 2009. Vol. 622. Pp. 195–220.

Read J.S., Winslow L.A., Hansen G.J.A., Van Den Hoek J., Hanson P.C., Bruce L.C., Markfort C.D. Simulating 2368 temperate lakes reveals weak coherence in stratification phenology // *Ecological Modelling*, 2014. Vol. 291. Pp. 142–150.

Reynolds C.S. Phytoplankton assemblages and their periodicity in stratifying lake systems // *Holarctic/Ecol.*, 1980. Vol. 3. № 3. Pp. 141–159.

Riley M.J., Stefan H.G. Dynamic lake water quality simulation model «MINLAKE». Minneapolis, MN: U of M, 1987. 140 p.

Robertson D.M., Imberger J. Lake Number, a quantitative indicator of mixing used to estimate changes in dissolved oxygen // *International Review of Hydrobiology*, 1994. Vol. 79. Pp. 159–176.

Rossolimo L.L. Die Boden Gasausscheidung und das Sauerstoffregime der Seen // *Verh. int. Verein. Limnol*, 1935. Vol. 7. Pp. 539–561.

Stefan H.G., Hondzo M., Fang X., Eaton J.G., McCormick J.H. Simulated long-term temperature and dissolved oxygen characteristics of lakes in the north-central United States and associated fish habitat limits // *Limnol. Oceanogr.*, 1996. Vol. 41. Pp. 1124–1135.

Strathman R.R. Estimating the organic carbon of phytoplankton from cell volume or plasma volume // *Limnol. Oceanogr.*, 1967. Vol. 12. Pp. 411–418.

Streeter H.W., Phelps E.B. A Study of the pollution and natural purification of the Ohio river. III. Factors concerned in the phenomena of oxidation and reaeration // *Public Health Bulletin*, 1925. № 146.

Testa J.M., Li Y., Lee Y.J., Li M., Brady D.C., Di Toro D.M., Kemp W.M., Fitzpatrick J.J. Quantifying the effects of nutrient loading on dissolved O₂ cycling

and hypoxia in Chesapeake Bay using a coupled hydrodynamic-biogeochemical model // *Journal of Marine Systems*, 2014. Vol. 139. Pp 139–158.

The dissolved oxygen handbook. A practical guide to dissolved oxygen measurements [Электронный ресурс]. 2009. Режим доступа: <https://www.yisi.com/File%20Library/Gated%20Documents/yisi-the-dissolved-oxygen-handbook-w39-0909-web.pdf>.

Trolle D., Skovgaard H., Jeppesen E. The Water Framework Directive: Setting the phosphorus loading target for a deep lake in Denmark using the 1D lake ecosystem model DYRESM–CAEDYM // *Ecological Modelling*, 2008. Vol. 219. Issues 1–2, 24. Pp. 138–152.

Tufford D.L., McKellar H.N. Spatial and temporal hydrodynamic and water quality modeling analysis of a large reservoir on the South Carolina (USA) coastal plain // *Ecological Modelling*, 1999. Vol. 114. Issues 2–3. Pp. 137–173.

Water Quality Analysis Simulation Program (WASP). Version 6.0. User's manual (DRAFT). Atlanta: US EPA, 2013. 267 p.

Winkler L.W. Die Bestimmung des in Wasser Gelösten Sauerstoffes // *Ber. d. Deutsch. Chem. Gesellschaft*, 1888. Vol. 21. Issue 2. Pp. 2843–2855.

Yajima H., Choi J. Changes in phytoplankton biomass due to diversion of an inflow into the Urayama Reservoir // *Ecological Engineering*, 2013. Vol. 58. Pp. 180–191.

Yannopoulos S.J., Kaloyannis H. Water quality modelling of the Pamvotis lake (Greece) using the wasp mathematical model // *Proc. of the International Conference «Protection and Restoration of the Environment IX»*. Kefalonia, Greece, 2008.

Zhang W., Rao Y.R. Application of a eutrophication model for assessing water quality in Lake Winnipeg // *Journal of Great Lakes Research*, 2012. Vol. 38. Suppl. 3. Pp. 158–173.

Zobell C.E., Stadler J. The effect of oxygen tension on the oxygen uptake of lake bacteria // *Journal of Bacteriology*, 1940. Vol. 39. Pp. 309–322.

Zou R., Zhang X., Liu Y., Chen X., Zhao L., Zhu X., Hed B., Guob H. Uncertainty-based analysis on water quality response to water diversions for Lake Chenghai: A multiple-pattern inverse modeling approach // *Journal of Hydrology*, 2014. Vol. 514. Pp. 1–14.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Расчетные характеристики кислородного режима
 водохранилищ Москворецкой водохозяйственной системы по данным
 гидролого-гидрохимических съемок

а) Можайское водохранилище

Дата	Уровень водной поверхности Н _в , м БС	Объем водохранилища V _{вдхр} , млн м ³	Запас кислорода М _{О₂} , тонн	Средняя концентрация О ₂ в водохранилище \bar{O}_2 , мг/л	Объем зоны с О ₂ <2мг/л, млн м ³	Доля зоны с О ₂ <2мг/л в водохранилище, %	Индекс кислорода ИК
1	2	3	4	5	6	7	8
28.06.1974	182,58	224,8	1795	8,0	6,3	3%	3,28
08.08.1974	182,01	208,5	1796	8,6	4,8	2%	1,17
20.11.1974	180,53	168,0	2058	12,2	0,0	0%	0,83
04.02.1975	179,94	153,7	1770	11,5	0,0	0%	3,46
19.03.1975	179,36	141,1	1405	10,0	0,0	0%	4,31
22.04.1975	182,67	227,5	2603	11,4	0,0	0%	1,22
26.12.1975	178,50	123,0	1210	9,8	0,0	0%	4,72
05.05.1976	182,82	232,1	2245	9,7	0,0	0%	3,07
19.05.1976	182,90	234,6	2503	10,7	0,0	0%	1,41
01.06.1976	182,70	228,4	2445	10,7	3,1	1%	1,78
15.06.1976	182,62	226,0	2039	9,0	0,0	0%	1,44
29.06.1976	182,69	228,1	2057	9,0	0,5	0%	1,79
13.07.1976	182,46	222,8	1795	8,1	1,5	1%	2,74
27.07.1976	182,39	220,5	1853	8,4	11,5	5%	5,25
10.08.1976	182,30	217,5	1349	6,2	29,3	13%	3,81
24.08.1976	182,04	209,4	1547	7,4	13,6	6%	2,31
07.09.1976	181,76	201,1	1517	7,5	6,7	3%	1,93
21.09.1976	181,44	193,6	1511	7,8	0,4	0%	2,31
05.10.1976	181,15	184,9	1583	8,6	0,0	0%	2,76
25.03.1977	179,44	143,2	1388	9,7	1,9	1%	5,10
23.03.1978	178,56	122,6	953	7,8	0,9	1%	6,87
05.02.1979	179,70	181,7	2095	11,5	0,0	0%	3,42
23.05.1979	181,34	223,0	3207	14,4	0,0	0%	3,61
20.08.1979	182,52	190,5	1599	8,4	20,2	11%	4,32
11.10.1979	181,04	147,8	1523	10,3	0,0	0%	1,07
06.02.1980	181,90	153,4	1685	11,0	0,0	0%	4,31
24.03.1980	182,76	147,3	1390	9,4	0,1	0%	5,82
02.06.1980	182,97	236,9	3665	15,5	0,0	0%	3,74
31.07.1980	179,68	230,3	2363	10,3	8,0	3%	3,81
14.10.1980	179,93	205,2	1934	9,4	0,0	0%	1,57
26.01.1981	181,07	182,6	2047	11,2	0,0	0%	3,72
19.08.1982	181,79	201,8	1771	8,8	5,4	3%	2,44
28.12.1983	180,09	157,6	1862	11,8	0,0	0%	2,79
29.01.1984	179,45	143,5	1367	9,5	0,3	0%	4,77
12.03.1984	178,23	116,7	794	6,8	6,6	6%	7,55
27.04.1984	182,16	213,0	1340	6,3	9,0	4%	5,76
28.05.1984	182,07	210,2	1571	7,5	1,7	1%	3,79
20.06.1984	181,84	203,3	1580	7,8	3,7	2%	3,21
24.07.1984	182,09	210,8	1527	7,2	4,6	2%	2,99
21.08.1984	182,09	210,8	1142	5,4	72,1	34%	4,91

Приложение А (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8
01.10.1984	181,70	199,3	1115	5,6	24,7	12%	5,05
12.07.1996	179,19	136,8	960	7,0	44,4	32%	5,36
26.08.1996	179,64	146,4	691	4,7	20,3	14%	4,25
13.09.1996	179,67	147,1	490	3,3	18,6	13%	5,96
05.07.1997	182,37	219,8	1544	7,0	68,5	31%	7,56
18.07.1997	181,86	204,0	1134	5,6	56,3	28%	4,48
17.06.1998	182,40	220,8	1276	5,8	8,7	4%	4,39
27.06.1999	181,45	193,9	1308	6,7	8,0	4%	4,26
10.07.1999	180,94	178,9	1016	5,7	52,2	29%	4,59
16.07.1999	180,68	171,9	1070	6,2	56,0	33%	5,47
25.12.1999	177,24	98,2	889	9,1	0,0	0%	4,91
21.02.2000	176,86	90,6	672	7,4	1,1	1%	6,68
20.03.2000	175,84	74,4	490	6,6	1,5	2%	7,74
30.06.2000	180,80	175,1	1256	7,2	5,3	3%	3,44
10.07.2000	180,69	172,2	1129	6,6	20,6	12%	3,86
11.07.2000	180,66	171,4	1156	6,7	17,2	10%	2,96
10.08.2000	180,14	158,9	1471	9,3	7,1	4%	2,64
27.01.2012	180,41	165,3	1754	10,6	0,0	0%	4,09
24.03.2012	179,99	155,0	1517	9,8	0,0	0%	4,67
16.05.2012	182,58	225,1	2528	11,2	0,0	0%	3,04
25.06.2012	182,54	223,9	1562	7,0	8,7	4%	4,64
10.07.2012	182,56	224,5	1477	6,6	33,1	15%	4,94
07.08.2012	182,23	214,8	858	4,0	96,0	45%	5,79
29.08.2012	181,78	201,9	1355	6,7	5,1	3%	2,93
01.11.2012	181,96	207,0	1933	9,3	0,0	0%	3,07
13.01.2013	181,09	183,0	1867	10,2	0,0	0%	4,58
10.06.2013	182,20	214,3	1328	6,2	18,1	8%	5,82
19.08.2013	180,72	172,9	984	5,7	57,4	33%	4,70

б) Рузское водохранилище

Дата	Уровень водной поверхности Н _в , м БС	Объем водохранилища V _{вдхр} , млн м ³	Запас кислорода М _{О₂} , тонн	Средняя концентрация О ₂ в водохранилище \bar{O}_2 , мг/л	Объем зоны с О ₂ <2мг/л, млн м ³	Доля зоны с О ₂ <2мг/л в водохранилище, %	Индекс кислорода ИК
1	2	3	4	5	6	7	8
27.06.1974	182,22	184,1	1573	8,5	22,7	12%	4,65
07.08.1974	182,05	179,6	1429	8,0	21,1	12%	2,77
21.11.1974	180,74	147,5	1957	13,3	0,0	0%	1,38
06.02.1975	180,36	139,2	1598	11,5	1,0	1%	4,50
20.03.1975	180,24	136,5	1364	10,0	2,3	2%	5,78
24.04.1975	182,39	188,7	2477	13,1	0,0	0%	0,89
25.12.1975	178,54	102,4	869	8,5	0,1	0%	7,35
24.03.1977	178,88	108,9	918	8,4	1,8	2%	6,84
25.07.1981	181,94	176,7	1314	7,4	62,5	35%	4,88
28.06.2000	179,85	127,9	947	7,4	15,9	12%	4,13
26.07.2000	179,61	123,0	982	8,0	2,2	2%	2,52
08.06.2013	181,94	176,7	1274	7,2	22,6	13%	4,84
17.08.2013	181,75	171,8	1261	7,3	47,7	28%	4,74

Приложение А (продолжение)

в) Озернинское водохранилище

Дата	Уровень водной поверхности Н _в , м БС	Объем вдхр V _{вдхр} , млн м ³	Запас кислорода M _{O₂} , тонн	Средняя концентрация O ₂ в водохранилище O ₂ , мг/л	Объем зоны с O ₂ <2мг/л, млн м ³	Доля зоны с O ₂ <2мг/л в водохранилище, %	Индекс кислорода ИК
1	2	3	4	5	6	7	8
27.06.1974	182,44	143,1	941	6,6	5,5	4%	4,16
06.08.1974	181,97	132,7	972	7,3	7,5	6%	2,30
21.11.1974	181,10	114,7	1314	11,5	0,0	0%	1,73
06.02.1975	180,20	98,1	994	10,1	0,2	0%	4,35
20.03.1975	180,19	97,9	849	8,7	3,4	3%	5,72
24.04.1975	182,30	139,7	1828	13,1	0,0	0%	1,58
25.12.1975	178,79	76,1	569	7,5	0,0	0%	6,76
24.03.1977	179,72	90,2	668	7,4	2,6	3%	7,31
02.07.2000	181,00	112,7	609	5,4	23,6	21%	4,23
26.07.2000	180,96	112,0	737	6,6	24,4	22%	3,46
10.06.2013	182,04	134,2	784	5,8	14,7	11%	4,83
18.08.2013	181,75	128,0	640	5,0	36,4	28%	4,41

г) Истринское водохранилище

Дата	Уровень водной поверхности Н _в , м БС	Объем вдхр V _{вдхр} , млн м ³	Запас кислорода M _{O₂} , тонн	Средняя концентрация O ₂ в водохранилище O ₂ , мг/л	Объем зоны с O ₂ <2мг/л, млн м ³	Доля зоны с O ₂ <2мг/л в водохранилище, %	Индекс кислорода ИК
1	2	3	4	5	6	7	8
26.06.1974	169,84	177,7	1279	7,2	12,0	7%	4,89
05.08.1974	169,65	171,6	1139	6,6	23,2	14%	3,18
19.11.1974	168,75	145,1	1610	11,1	0,0	0%	1,79
05.02.1975	168,34	134,4	1459	10,9	0,2	0%	3,79
18.03.1975	168,10	128,5	1199	9,3	0,4	0%	5,22
22.04.1975	169,73	174,0	2289	13,2	0,0	0%	1,15
22.12.1975	167,50	114,9	918	8,0	0,0	0%	5,87
23.03.1977	166,94	103,3	816	7,9	2,7	3%	6,66
23.07.1991	168,84	147,4	988	6,7	36,1	24%	4,18
30.07.1991	169,08	154,2	1150	7,5	22,9	15%	4,24
06.08.1991	168,91	149,4	1001	6,7	41,8	28%	6,24
26.06.1998	169,36	159,3	817	5,1	40,3	25%	4,80
30.06.1999	168,56	139,2	782	5,6	46,9	34%	4,47
06.07.2000	167,85	122,7	797	6,5	35,3	29%	3,22
28.07.2000	167,77	121,8	737	6,0	22,2	18%	5,78
09.06.2013	169,42	164,2	1007	6,1	12,5	8%	5,74
21.08.2013	169,22	158,1	837	5,3	40,9	26%	5,22

Приложение Б. Параметры блока химико-биологических взаимодействий
модели ГМВ

Обозначение	Значение	Название	Единицы измерения
1	2	3	4
Рыбы			
FSH1T1	1	Критическая температура, ниже которой ихтиологические процессы останавливаются	°C
FSH1T2	35,2	Нижний оптимум температуры для ихтиологических процессов	°C
FSH1T3	28,4	Верхний оптимум температуры для ихтиологических процессов	°C
FSH1T4	35,2	Летальная температура для рыб	°C
FSH1K1	0,1	Температурный множитель для температуры FSH1T1	
FSH1K2	0,98	Температурный множитель для температуры FSH1T2	
FSH1K3	0,98	Температурный множитель для температуры FSH1T3	
FSH1K4	0,1	Температурный множитель для температуры FSH1T4	
FMORTA	0,01	Максимальная скорость смертности рыб	1/сут
FRESP	0,01	Максимальная скорость дыхания рыб	1/сут
FSHMAX	0,015	Максимальная скорость питания рыб	1/сут
FS2FSH	0,2	Коэффициент полунасыщения для питания рыб	г/м ³
FEFFIC	0,8	Эффективность анаболизма (ассимиляции) рыб	
Зоопланктон			
ZMAX	0,44	Максимальная скорость питания для зоопланктона	1/сут
ZMORTA	0,01	Максимальная скорость смертности зоопланктона	1/сут
ZEFIC	0,5	Эффективность анаболизма (ассимиляции) зоопланктона	1/сут
PREF(i) (i=1÷4)	0,5/0/0/0,5	Фактор предпочтительного питания зоопланктона из i-го блока водорослей (i=1÷3) и детрита (i=4)	1/сут
ZRESP	0,14	Максимальная скорость дыхания зоопланктона	1/сут
ZOOMIN	0	Порог кормовой концентрации, с которой зоопланктон начинает питаться	г/м ³
ZS2P	0,3	Коэффициент полунасыщения зоопланктона для выедания водорослей и детрита	мг/л
ZOO1T1	0	Нижняя критическая температура для зоопланктона	°C
ZOO1T2	20	Нижний оптимум температуры для зоопланктона	°C
ZOO1T3	26	Верхний оптимум температуры для зоопланктона	°C
ZOO1T4	36	Верхняя летальная температура для зоопланктона	°C
ZOO1K1	0,1	Температурный множитель для температуры ZOO1T1	

Приложение Б (продолжение)

1	2	3	4
ZOO1K2	0,98	Температурный множитель для температуры ZOO1T2	
ZOO1K3	0,98	Температурный множитель для температуры ZOO1T3	
ZOO1K4	0,1	Температурный множитель для температуры ZOO1T4	
Параметры влияния на фотосинтез фитопланктона			
PISAT(i) (i=1÷3)	50/20/54	Насыщающая интенсивность света при максимальной фотосинтезирующей скорости для i-ой группы водорослей	ккал/м ² /час
PS2PO4(i) (i=1÷3)	0,009	Фосфорный коэффициент полунасыщения i-й группы водорослей	мг/л
PS2N(i) (i=1÷3)	0,014/0,01/0,01	Азотный коэффициент полунасыщения i-й группы водорослей	мг/л
PS2CO2(i) (i=1÷3)	0,12/0,1/0,1	Диоксида углерода коэффициент полунасыщения 1-й группы водорослей	мг/л
PS2SI	0,05	Коэффициент полунасыщения кремния	мг/л
Параметры влияния температурных условий на жизнедеятельность фитопланктона			
ALGT1(i) (i=1÷3)	10,0/12,0/0	Нижняя критическая температура, при которой начинается фитопланктонный метаболизм (обмен веществ) для i-ой группы водорослей	° C
ALGT2(i) (i=1÷3)	15,0/19,0/8,0	Нижний оптимум температуры для i-ой группы водорослей, при которой процессы метаболизма идут с максимальной скоростью	° C
ALGT3(i) (i=1÷3)	28,0/25,0/12,0	Верхний оптимум температуры для i-ой группы водорослей, при которой процессы метаболизма идут с максимальной скоростью	° C
ALGT4(i) (i=1÷3)	35,0/35,0/17,0	Верхняя летальная температура для i-ой группы водорослей	° C
ALGK1(i) (i=1÷3)	0,3/0,1/0,1	Температурный множитель для температуры ALGT1 для i-ой группы водорослей	
ALGK2(i) (i=1÷3)	0,98/0,98/0,98	Температурный множитель для температуры ALGT2 для i-ой группы водорослей	
ALGK3(i) (i=1÷3)	0,98/0,98/0,98	Температурный множитель для температуры ALGT3 для i-ой группы водорослей	
ALGK4(i) (i=1÷3)	0,3/0,1/0,1	Температурный множитель для температуры ALGT4 для i-ой группы водорослей	
Максимальная скорость продукции, дыхания в темноте, экскреции, смертности			
PMAX(i) (i=1÷3)	1,5/1,4/3,3	Максимум валовой продукционной скорости i-й группы водорослей	1/сут
PRESP(i) (i=1÷3)	0,14/0,17/0,14	Максимум скорости дыхания в темноте i-й группы водорослей	1/сут
PEXCR(i) (i=1÷3)	0,05/0,04/0,04	Максимум скорости экскреции (выделения) i-й группы водорослей	1/сут
PMORT(i) (i=1÷3)	0,07/0,06/0,01	Максимум скорости естественной смертности i-й группы водорослей	1/сут
Стехиометрические эквиваленты			
BIOP	0,004	Стехиометрический эквивалент между органическим веществом и ортофосфатами	

Приложение Б (продолжение)

1	2	3	4
BION	0,05	Стехиометрический эквивалент между органическим веществом и азотом	
BIOC	0,46	Стехиометрический эквивалент между органическим веществом и углеродом	
ALGAS	0,01	Стехиометрический эквивалент между органическим веществом и кремнием	
O2FAC	0,8	Стехиометрический эквивалент для продукции кислорода при фотосинтезе	
Кислородные требования			
O2RESP	1,1	Кислородное требование для биологического дыхания	мг/л
O2DET	1,4	Стехиометрическое требование для O2 при разложении детрита и органических седиментов	мг/л
O2DOM	1,4	Стехиометрический эквивалент для разложения OB	мг/л
O2FE2	0,14	Потребность кислорода для окисления восстановленного железа	мг/л
O2MN2	0,15	Потребность кислорода для восстановления марганца	мг/л
O2NH4	4,57	Кол-во г O ₂ , требуемого для окисления 1 г NH ₄	мг/л
O2S2	2	Потребность кислорода для окисления сульфидов	мг/л
SETL(i) (i=1÷3)	0,02/0,25/0,35	скорость осаждения i-ой группы фитопланктона	м/сут
Параметры детрита			
DETT1	4	Минимальная температура для разложения детрита	° C
DETT2	28	Температура максимальной скорости разложения детрита	° C
DETK1	0,01	Температурный множитель для температуры DETT1	
DETK2	0,98	Температурный множитель для температуры DETT2	
DETUDK	0,009	Скорость окисления детрита	л/сут
DSETL	0,35	Скорость осаждения детрита	м/сут
ALDIGO	0,25	Доля биомассы водорослей, погибших естественной смертью	
Параметры минеральных взвесей и седиментов			
SSETL	0,05	Скорость осаждения неорганических взвесей	м/час
SEDDK	0,008	Скорость разложения донных отложений	л/сут
SEDTHK	0,05	Толщина слоя активных седиментов	см
STLMN4	0,05	Скорость осаждения для окисленных частиц четырехвалентного марганца	м/сут
STLFE3	0,05	Скорость осаждения для окисленных частиц железа	м/сут
XP4REL	0,001	Скорость, с которой фосфор восстанавливается из донных отложений при анаэробных условиях	г/(м ² сут)
OXYLIM	0,5	Концентрация растворенного кислорода, при которой начинаются анаэробные процессы в водоеме	г/м ³

Приложение Б (продолжение)

1	2	3	4
Параметры растворенного органического вещества			
DOMT1	2	Минимальная температура, при которой ОВ еще разлагаются	°С
DOMT2	20	Температура, при которой разложение происходит с максимальной скоростью	°С
DOMK1	0,12	Температурный множитель для температуры DOMT1	
DOMK2	0,98	Температурный множитель для температуры DOMT2	
DOMDK	0,01	Максимальная скорость разложения нестойкого ОВ до минерального	1/сут
DOMRFR	0,005	Максимальная скорость разложения нестойкого ОВ до стойкого	1/сут
RFRDK	0,005	Максимальная скорость разложения стойкого ОВ до минерального	1/сут
Параметры фосфора			
ADMAXP	0,003	Коэффициент, представляющий максимальное количество фосфора, адсорбирующегося твердыми частицами	г Р·м ³ / г.тв.тела·м ³
ADSRBP	30	Коэффициент адсорбции фосфора	м ³ /г
Параметры аммиака			
ADMAXN	0,005	Коэффициент, представляющий максимальное количество аммиака, адсорбирующегося твердыми частицами	г N·м ³ / г.тв.тела·м ³
ADSRBN	40	Коэффициент адсорбции азота	м ³ /г
DNH4K1	0,1	Температурный множитель для температуры DNH4T1	
DNH4K2	0,98	Температурный множитель для температуры DNH4T2	
CNH4DK	0,08	Скорость окисления аммиака	1/сут
CNREL	0,01	Скорость, с которой азот восстанавливается из донных отложений при анаэробных условиях	г/(м ² сут)
CNO3DK	0,001	Скорость денитрификации нитритов+нитратов	1/сут
SREL	0,12·10 ⁻⁴	Скорость, с которой сера восстанавливается из донных отложений при анаэробных условиях	г/(м ² сут)
Параметры марганца			
TMN2OX	0,35	Скорость, с которой двухвалентный марганец окисляется при аэробных условиях	1/сут
TMN4RE	0,02	Скорость восстановления четырехвалентного марганца	1/сут
TMNREL	0,1	Скорость, с которой двухвалентный марганец восстанавливается из донных отложений при анаэробных условиях	г/(м ² сут)
Параметры железа			
FE3RED	0,03	Скорость восстановления для частиц железа	1/сут
FESBDK	0,5	Скорость, с которой FeS окисляется при аэробных условиях	1/сут
			1/сут

Приложение Б (продолжение)

1	2	3	4
FE2OXI	0	Скорость, с которой двухвалентное железо окисляется при аэробных условиях	1/сут
FESADK	0	Скорость, с которой FeS окисляется при аэробных условиях	1/сут
FEREL	0,1	Скорость, с которой Fe ²⁺ восстанавливается из донных отложений при анаэробных условиях	1/сут
S2DK	0	Скорость удаления S при реакции с Fe при анаэробных условиях	1/сут
FESSTL	0,9	Скорость, с которой частицы FeS осаждаются в водной колонке	м/сут
SO4RED	0,001	Скорость, с которой SO ₄ восстанавливается до S ²⁻	1/сут
S2OXI	0,3	Скорость, с которой S окисляется в водной колонке	1/сут

Приложение В. Оценка погрешности смоделированных значений содержания растворенного кислорода в водохранилищах Москворецкой водной системы по результатам серии валидационных расчетов (S – среднеквадратическая ошибка расчета (мг/л), T – индекс Тейла)

Водохранилище	Дата съемки	Длина ряда n	S	T
1	2	3	4	5
Озернинское	27.06.1974	60	1,5	0,12
	06.08.1974	34	2,9	0,22
	21.11.1974	42	3,2	0,14
	06.02.1975	42	2,4	0,14
	20.03.1975	42	2,1	0,14
	24.04.1975	51	6,2	0,27
	25.12.1975	34	2,9	0,19
	26.07.2000	28	2,3	0,17
	02.07.2000	26	1,8	0,14
	10.06.2013	17	3,0	0,10
	18.08.2013	17	1,5	0,03
	Истринское	26.06.1974	54	2,3
05.08.1974		51	1,5	0,09
19.11.1974		49	1,9	0,08
05.02.1975		51	2,9	0,18
18.03.1975		52	2,7	0,19
22.04.1975		53	5,9	0,28
22.12.1975		46	2,9	0,17
06.07.2000		36	3,0	0,23
28.07.2000		41	1,3	0,12
09.06.2013		25	3,1	0,09
21.08.2013		26	2,6	0,09
Рузское		27.06.1974	64	2,0
	06.08.1974	59	2,0	0,16
	21.11.1974	59	3,7	0,16
	06.02.1975	64	3,3	0,22
	20.03.1975	63	3,0	0,23
	24.04.1975	70	3,6	0,18
	25.12.1975	48	3,1	0,21
	28.06.2000	44	2,8	0,24
	26.07.2000	31	1,9	0,15
	08.06.2013	18	3,0	0,09
	17.08.2013	18	2,5	0,10

Приложение В (продолжение)

1	2	3	4	5
Можайское	28.06.1974	88	2,1	0,15
	08.08.1974	70	2,5	0,17
	20.11.1974	59	4,4	0,19
	04.02.1975	67	2,6	0,15
	19.03.1975	67	2,1	0,13
	22.04.1975	81	2,4	0,11
	26.12.1975	56	2,6	0,16
	17.06.1998	180	2,6	0,22
	27.06.1999	182	1,6	0,13
	10.07.1999	211	2,6	0,24
	16.07.1999	187	2,2	0,17
	25.12.1999	27	1,3	0,08
	21.02.2000	26	1,5	0,11
	20.03.2000	43	1,2	0,11
	30.06.2000	144	1,6	0,12
	10.07.2000	142	1,8	0,14
	11.07.2000	148	1,5	0,12
	10.08.2000	100	3,1	0,22
	20.06.2010	97	2,3	0,19
	07.07.2010	86	2,5	0,24
	26.07.2010	68	2,4	0,32
	21.08.2010	74	2,4	0,25
	13.06.2011	59	1,9	0,14
	02.07.2011	20	2,3	0,19
	16.07.2011	29	2,8	0,22
	19.07.2011	33	3,2	0,27
	15.08.2011	76	2,9	0,27
	10.06.2013	19	3,3	0,10
	19.08.2013	22	2,2	0,06

Приложение Г. Результаты расчетов кислородного баланса водохранилищ Москворецкой водохозяйственной системы в летний период по результатам моделирования

Год	Форма выражения	ПРИТОК						СТОК												ЗАПАС	
		Приток с реками	Боковой приток	Приток ДНО	Осадки	Фотосинтез	Поступление из атмосферы	Обмен с дном	Сбросы гидроузла	Уход в атмосферу	Дыхание фитопланктона	Загрязнения на нитрификацию	Окисление детрита	Дыхание зоопланктона	Окисление лабильного ОВ	Окисление стойкого ОВ	Окисление восстановленных веществ	Потребление грунтами дна	Дыхание рыб	начальный	конечный
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Можайское водохранилище																					
1970	тонн	86	9,8	0,0	34	11697	38	0,0	382	3586	4183	138	596	530	1484	1894	4,4	420	220	2894	1316
1970	%	1%	0%	0%	0%	99%	0%	0%	3%	27%	31%	1%	4%	4%	11%	14%	0%	3%	2%		
1974	тонн	230	33	0,0	53	11810	17	8,1	622	3766	4070	177	816	1439	739	2673	5,2	445	269	4063	1151
1974	%	2%	0%	0%	0%	97%	0%	0%	4%	25%	27%	1%	5%	10%	5%	18%	0%	3%	2%		
1975	тонн	173	21	0,0	69	16085	20	11	104	5407	5333	380	518	1647	911	2045	23	318	292	1877	1247
1975	%	1%	0%	0%	0%	98%	0%	0%	1%	32%	31%	2%	3%	10%	5%	12%	0%	2%	2%		
1984	тонн	427	49	0,0	77	13133	11	33	265	3971	4315	206	561	1401	691	2032	8,0	370	289	2066	1582
1984	%	3%	0%	0%	1%	96%	0%	0%	2%	28%	31%	1%	4%	10%	5%	14%	0%	3%	2%		
1990	тонн	518	63	0,0	68	11962	134	23	307	3135	4008	220	610	1511	711	2419	7,8	365	258	2114	1278
1990	%	4%	0%	0%	1%	94%	1%	0%	2%	23%	30%	2%	4%	11%	5%	18%	0%	3%	2%		
1996	тонн	232	27	0,0	52	8307	21	10	42	1935	3046	177	367	546	1011	1225	4,2	336	175	1086	845
1996	%	3%	0%	0%	1%	96%	0%	0%	0%	22%	34%	2%	4%	6%	11%	14%	0%	4%	2%		
1997	тонн	473	60	0,0	44	11797	24	42	448	3719	4057	216	679	1391	715	2499	11	367	301	2903	827
1997	%	4%	0%	0%	0%	95%	0%	0%	3%	26%	28%	1%	5%	10%	5%	17%	0%	3%	2%		
1999	тонн	177	21	0,0	45	11862	399	3,4	241	3690	4664	236	638	439	615	2429	9,0	340	305	2201	1092
1999	%	1%	0%	0%	0%	95%	3%	0%	2%	27%	34%	2%	5%	3%	5%	18%	0%	2%	2%		

Приложение Г (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
2000	тонн	501	62	0,0	78	12237	0,81	16	422	4020	3891	149	653	1188	540	2449	4,8	404	200	2374	1313
2000	%	4%	0%	0%	1%	95%	0%	0%	3%	29%	28%	1%	5%	9%	4%	18%	0%	3%	1%		
2004	тонн	640	75	0,0	93	13843	0,00	28	375	4353	4749	236	598	1608	615	2924	17	274	290	2540	1121
2004	%	4%	1%	0%	1%	94%	0%	0%	2%	27%	30%	1%	4%	10%	4%	18%	0%	2%	2%		
2010	тонн	246	28	0,0	64	13774	50	17	95	3457	4678	334	1017	904	736	2617	23	356	368	1765	1328
2010	%	2%	0%	0%	0%	97%	0%	0%	1%	24%	32%	2%	7%	6%	5%	18%	0%	2%	3%		
2011	тонн	190	23	0,0	86	13404	13	8,4	375	4066	5093	221	594	756	814	2228	13	348	271	2197	1121
2011	%	1%	0%	0%	1%	98%	0%	0%	3%	28%	34%	1%	4%	5%	6%	15%	0%	2%	2%		
2012	тонн	438	53	0,0	76	15546	0,44	41	209	4727	5616	373	447	724	1586	2081	18	324	294	1798	1467
2012	%	3%	0%	0%	0%	96%	0%	0%	1%	29%	34%	2%	3%	4%	10%	13%	0%	2%	2%		
Русское водохранилище																					
1974	тонн	94	163	0,0	56	9184	0,0	7,0	547	3207	3386	142	461	587	635	2179	6,2	252	265	3441	1141
1974	%	1%	2%	0%	1%	97%	0%	0%	5%	27%	29%	1%	4%	5%	5%	19%	0%	2%	2%		
1975	тонн	47	28	0,0	70	12072	0,1	2,7	391	4245	4543	161	240	398	777	1427	17	159	275	1870	1052
1975	%	0%	0%	0%	1%	99%	0%	0%	3%	34%	36%	1%	2%	3%	6%	11%	0%	1%	2%		
1990	тонн	743	398	0,0	72	14617	0,0	38	1111	5298	4416	233	364	646	447	2114	9,8	265	248	1744	1550
1990	%	5%	3%	0%	0%	92%	0%	0%	7%	35%	29%	2%	2%	4%	3%	14%	0%	2%	2%		
1997	тонн	152	261	0,0	35	6747	2,9	4,1	804	2160	2355	129	289	225	311	1115	11	331	266	1417	508
1997	%	2%	4%	0%	0%	94%	0%	0%	10%	27%	29%	2%	4%	3%	4%	14%	0%	4%	3%		
2000	тонн	127	225	0,0	86	9344	0,0	12	588	2398	2552	101	320	610	400	1770	5,4	253	164	2632	1184
2000	%	1%	2%	0%	1%	96%	0%	0%	6%	26%	28%	1%	3%	7%	4%	19%	0%	3%	2%		
Озернинское водохранилище																					
1974	тонн	137	103	0,0	41	5734	13	14	401	1648	2040	159	271	431	275	1383	29	246	184	1891	753
1974	%	2%	2%	0%	1%	95%	0%	0%	6%	23%	29%	2%	4%	6%	4%	20%	0%	3%	3%		
1975	тонн	57	43	0,0	51	5554	4,2	5,6	275	1831	1961	222	145	146	263	932	41	127	163	1261	792
1975	%	1%	1%	0%	1%	97%	0%	0%	5%	30%	32%	4%	2%	2%	4%	15%	1%	2%	3%		
1990	тонн	174	131	0,0	48	6348	0,0	12	319	1856	1998	216	197	479	236	1130	53	164	179	1072	902
1990	%	3%	2%	0%	1%	95%	0%	0%	5%	27%	29%	3%	3%	7%	3%	17%	1%	2%	3%		

Приложение Г (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1997	тонн	84	63	0,0	33	2795	48	9,9	258	578	1002	197	156	152	159	840	15	172	130	1298	612
1997	%	3%	2%	0%	1%	92%	2%	0%	7%	16%	27%	5%	4%	4%	4%	23%	0%	5%	4%		
2000	тонн	89	67	0,0	52	4623	5,5	5,2	358	1138	1539	153	181	290	216	1145	4,0	220	119	1232	636
2000	%	2%	1%	0%	1%	96%	0%	0%	7%	21%	29%	3%	3%	5%	4%	21%	0%	4%	2%		
Истринское водохранилище																					
1974	тонн	165	143	0,0	57	7377	46	11	393	1890	2459	143	485	839	343	1502	5,0	428	281	2295	1075
1974	%	2%	2%	0%	1%	95%	1%	0%	4%	22%	28%	2%	6%	10%	4%	17%	0%	5%	3%		
1975	тонн	199	121	0,0	71	7766	0,0	12	327	2116	2784	257	294	620	417	1151	9,8	347	254	1537	997
1975	%	2%	1%	0%	1%	95%	0%	0%	4%	25%	32%	3%	3%	7%	5%	13%	0%	4%	3%		
1990	тонн	286	245	0,0	79	7521	24	21	407	2066	2416	320	275	615	250	1356	13	328	233	1434	1179
1990	%	4%	3%	0%	1%	92%	0%	0%	5%	25%	29%	4%	3%	7%	3%	16%	0%	4%	3%		
1997	тонн	114	99	0,0	42	6349	21	12	106	1752	2099	140	332	691	343	1169	10	378	208	1649	919
1997	%	2%	1%	0%	1%	96%	0%	0%	1%	24%	29%	2%	5%	10%	5%	16%	0%	5%	3%		
2000	тонн	108	94	0,0	66	5232	17	1,8	355	907	1773	129	319	452	307	1107	4,0	416	242	1401	810
2000	%	2%	2%	0%	1%	95%	0%	0%	6%	15%	30%	2%	5%	8%	5%	18%	0%	7%	4%		

Приложение Д. Оценка вклада внутриводоемных течений в кислородный
баланс Москворецких водохранилищ в летний период по данным
моделирования

а) Можайское водохранилище

Год	Форма выражения	Стоковое течение			Плотностные течения			Компенсационные течения			Дрейфовые течения		
		приток	сток	Δ	приток	сток	Δ	приток	сток	Δ	приток	сток	Δ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ВЕРХОВОЙ РАЙОН													
1970	тонны %	0,0 0%	209 4%	-209	18 0%	222 4%	-204	2014 36%	739 13%	1275	1394 25%	2523 43%	-1129
1974	тонны %	0,0 0%	386 6%	-386	240 4%	103 2%	137	1133 19%	1289 20%	-156	1790 30%	1719 27%	72
1975	тонны %	0,0 0%	249 6%	-249	65 2%	112 3%	-47	640 15%	743 17%	-103	1185 28%	907 21%	278
1984	тонны %	0,0 0%	384 6%	-384	113 2%	221 4%	-108	1219 20%	577 9%	642	1000 16%	1586 26%	-586
1990	тонны %	0,0 0%	480 7%	-480	350 5%	81 1%	269	1457 22%	869 13%	588	1151 18%	2135 33%	-984
1996	тонны %	0,0 0%	179 6%	-179	39 1%	72 2%	-34	999 32%	507 16%	492	635 20%	1124 36%	-489
1997	тонны %	0,0 0%	582 10%	-582	711 12%	93 2%	618	698 12%	1235 20%	-537	1019 17%	1055 17%	-35
1999	тонны %	0,0 0%	264 6%	-264	128 3%	139 3%	-11	975 23%	457 10%	519	644 15%	1192 27%	-548
2000	тонны %	0,0 0%	521 8%	-521	31 0%	196 3%	-165	1832 28%	733 11%	1099	1219 19%	2175 33%	-956
2004	тонны %	0,0 0%	503 7%	-503	35 0%	214 3%	-178	1411 19%	317 4%	1093	744 10%	1947 26%	-1203
2010	тонны %	0,0 0%	261 5%	-261	407 8%	262 5%	145	716 14%	1205 22%	-489	1383 26%	942 17%	442
2011	тонны %	0,0 0%	294 5%	-294	60 1%	956 16%	-895	1905 32%	330 5%	1575	760 13%	1530 25%	-770
2012	тонны %	0,0 0%	378 5%	-378	10 0%	869 12%	-859	1959 27%	313 4%	1646	902 12%	1879 25%	-977
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ РАЙОН													
1970	тонны %	209 1%	336 2%	-127	275 2%	525 3%	-250	5867 37%	3884 24%	1983	5920 37%	7644 46%	-1724
1974	тонны %	386 2%	545 3%	-159	1447 9%	524 3%	923	4253 26%	5533 32%	-1280	6437 40%	6094 36%	343
1975	тонны %	249 2%	303 3%	-54	444 4%	96 1%	348	1929 17%	2810 24%	-881	3927 34%	3242 28%	685
1984	тонны	384	364	20	1729	209	1521	3168	3855	-687	4083	5041	-958

Приложение Д (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1984	%	3%	3%		13%	2%		23%	28%		30%	37%	
1990	тонны	480	420	60	234	1324	-1090	5084	2930	2155	4897	5852	-955
	%	3%	3%		2%	9%		35%	20%		34%	40%	
1996	тонны	179	113	66	127	145	-18	2172	1774	398	2621	3047	-426
	%	2%	1%		2%	2%		28%	22%		33%	39%	
1997	тонны	582	669	-87	1200	1105	95	3054	3260	-206	3658	3408	250
	%	5%	5%		10%	9%		25%	26%		30%	27%	
1999	тонны	264	356	-92	718	714	4	2917	2256	661	2760	3316	-556
	%	2%	3%		7%	7%		27%	21%		26%	30%	
2000	тонны	521	538	-17	424	856	-432	5448	3534	1914	5111	6587	-1476
	%	3%	3%		3%	5%		36%	23%		33%	42%	
2004	тонны	503	526	-23	359	1015	-656	4883	2200	2683	3693	5596	-1903
	%	4%	4%		3%	7%		36%	16%		27%	40%	
2010	тонны	261	296	-35	1467	764	703	2642	4121	-1480	4453	3513	940
	%	2%	2%		11%	6%		20%	31%		34%	27%	
2011	тонны	294	406	-111	1745	1125	620	3993	3328	665	3290	4633	-1344
	%	2%	3%		13%	8%		29%	24%		24%	33%	
2012	тонны	378	400	-22	1945	428	1517	3553	3514	39	3925	5585	-1660
	%	2%	3%		13%	3%		23%	23%		26%	37%	
НИЖНИЙ РАЙОН													
1970	тонны	336	0,0	336	507	53	454	1871	5128	-3258	6250	3397	2853
	%	2%	0%		3%	0%		13%	33%		42%	22%	
1974	тонны	545	0,0	545	284	1344	-1060	4400	2965	1436	4303	4718	-415
	%	4%	0%		2%	8%		29%	18%		29%	28%	
1975	тонны	303	0,0	303	31	332	-301	2169	1186	984	2057	3020	-963
	%	2%	0%		0%	2%		16%	9%		15%	22%	
1984	тонны	364	0,0	364	95	1508	-1413	2636	2591	45	4041	2497	1544
	%	3%	0%		1%	11%		21%	20%		32%	19%	
1990	тонны	420	0,0	420	973	152	821	1473	4216	-2744	4700	2762	1939
	%	3%	0%		7%	1%		11%	31%		36%	20%	
1996	тонны	113	0,0	113	106	55	52	775	1665	-890	2413	1498	915
	%	1%	0%		1%	1%		10%	21%		31%	19%	
1997	тонны	669	0,0	669	394	1106	-713	2561	1818	743	2389	2604	-215
	%	6%	0%		3%	9%		23%	14%		21%	21%	
1999	тонны	356	0,0	356	586	579	7	1280	2460	-1180	2672	1568	1105
	%	3%	0%		5%	5%		12%	21%		25%	14%	
2000	тонны	538	0,0	538	825	228	597	1702	4716	-3013	5368	2936	2432
	%	4%	0%		6%	2%		12%	32%		38%	20%	
2004	тонны	526	0,0	526	979	145	834	789	4566	-3777	4851	1746	3106
	%	4%	0%		8%	1%		6%	34%		39%	13%	
2010	тонны	296	0,0	296	357	1205	-848	3406	1434	1972	2131	3508	-1378
	%	2%	0%		3%	9%		25%	11%		16%	26%	
2011	тонны	406	0,0	406	1064	789	275	1423	3663	-2240	3873	1759	2114
	%	3%	0%		8%	6%		11%	27%		30%	13%	

Приложение Д (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2012	тонны %	400 3%	0,0 0%	400	418 3%	1076 8%	-659	1555 12%	3240 24%	-1685	4684 35%	2046 15%	2637

б) Рузское водохранилище

Год	Форма выражения	Стоковое течение			Плотностные течения			Компенсационные течения			Дрейфовые течения		
		Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ВЕРХОВОЙ РАЙОН													
1974	тонны	0,0	220	-220	135	75	60	104	179	-75	464	317	146
	%	0%	8%		6%	3%		4%	7%		19%	12%	
1975	тонны	0,0	125	-125	118	6,5	112	17	189	-172	321	161	160
	%	0%	6%		6%	0%		1%	9%		15%	7%	
1990	тонны	0,0	1081	-1081	179	117	61	117	177	-60	392	404	-12
	%	0%	22%		4%	2%		2%	4%		8%	8%	
1997	тонны	0,0	334	-334	13	142	-129	164	21	142	109	117	-8
	%	0%	20%		1%	8%		10%	1%		7%	7%	
2000	тонны	0,0	250	-250	53	353	-300	415	54	360	426	404	21
	%	0%	9%		2%	12%		15%	2%		16%	14%	
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ РАЙОН													
1974	тонны	292	868	-576	1540	1005	535	1649	2206	-557	2862	2400	463
	%	3%	8%		15%	9%		16%	21%		29%	23%	
1975	тонны	158	406	-248	536	274	262	721	1131	-409	1749	1099	650
	%	2%	5%		7%	4%		9%	15%		22%	15%	
1990	тонны	1207	1102	105	456	448	8	1708	869	838	2262	2375	-113
	%	11%	11%		4%	5%		15%	9%		20%	24%	
1997	тонны	444	679	-235	614	398	216	558	856	-298	884	872	12
	%	8%	12%		12%	7%		11%	15%		17%	16%	
2000	тонны	333	1479	-1146	1528	1755	-227	2108	2005	102	2550	3433	-883
	%	3%	14%		15%	16%		21%	19%		25%	32%	
НИЖНИЙ РАЙОН													
1974	тонны	367	0,0	367	505	1040	-535	1705	1265	441	1899	1868	30
	%	4%	0%		6%	11%		20%	13%		22%	19%	
1975	тонны	211	0,0	211	79	341	-262	936	445	491	904	1159	-254
	%	3%	0%		1%	4%		12%	5%		11%	14%	
1990	тонны	924	0,0	924	269	278	-8	690	1365	-674	2196	1360	837
	%	9%	0%		3%	3%		7%	14%		22%	14%	
1997	тонны	469	0,0	469	189	405	-216	647	434	213	663	597	66
	%	9%	0%		4%	7%		13%	8%		13%	11%	
2000	тонны	390	0,0	390	666	439	227	916	1981	-1065	2344	1625	718
	%	5%	0%		8%	5%		11%	21%		27%	17%	

Приложение Д (продолжение)

в) Озернинское водохранилище

Год	Форма выражения	Стоковое течение			Плотностные течения			Компенсационные течения			Дрейфовые течения		
		Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ВЕРХОВОЙ РАЙОН													
1974	тонны %	0,0 0%	207 8%	-207	130 5%	359 14%	-228	660 27%	131 5%	529	392 16%	677 26%	-286
1975	тонны %	0,0 0%	101 6%	-101	45 3%	163 9%	-118	417 24%	38 2%	379	243 14%	493 28%	-250
1990	тонны %	0,0 0%	223 11%	-223	14 1%	346 17%	-332	478 24%	9,7 0%	469	194 10%	338 17%	-143
1997	тонны %	0,0 0%	131 9%	-131	307 22%	141 10%	166	164 12%	336 23%	-172	356 26%	273 19%	83
2000	тонны %	0,0 0%	148 10%	-148	35 2%	164 11%	-130	266 18%	38 2%	228	239 16%	309 20%	-70
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ РАЙОН													
1974	тонны %	243 2%	298 3%	-55	905 9%	2119 20%	-1213	4049 40%	1879 18%	2170	2737 27%	3726 36%	-989
1975	тонны %	125 2%	169 2%	-44	272 4%	1153 17%	-881	2752 41%	808 12%	1944	1503 23%	2612 38%	-1109
1990	тонны %	253 3%	256 3%	-3	550 7%	1628 21%	-1078	2149 28%	1280 17%	869	2461 32%	2266 30%	195
1997	тонны %	155 2%	194 3%	-38	1361 20%	1320 19%	42	1878 28%	2347 34%	-469	2193 33%	1829 27%	365
2000	тонны %	178 3%	227 3%	-49	569 8%	1561 22%	-992	2098 30%	1380 20%	718	2473 36%	2219 31%	254
НИЖНИЙ РАЙОН													
1974	тонны %	348 3%	0,0 0%	348	2534 21%	1018 8%	1516	1895 16%	5229 42%	-3334	4656 39%	2826 22%	1830
1975	тонны %	209 3%	0,0 0%	209	1438 17%	337 4%	1101	788 9%	3567 42%	-2780	3229 39%	1517 18%	1712
1990	тонны %	291 3%	0,0 0%	291	2377 25%	212 2%	2164	768 8%	3483 37%	-2715	2876 30%	2286 24%	589
1997	тонны %	232 3%	0,0 0%	232	1114 14%	2007 24%	-893	3258 41%	1832 22%	1426	1932 24%	2511 30%	-579
2000	тонны %	273 3%	0,0 0%	273	2441 28%	437 5%	2004	1149 13%	3345 37%	-2196	2679 30%	2509 27%	170

Приложение Д (продолжение)

г) Истринское водохранилище

Год	Форма выражения	Стоковое течение			Плотностные течения			Компенсационные течения			Дрейфовые течения		
		Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ	Приток	Сток	Δ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ВЕРХОВОЙ РАЙОН													
1974	тонны	0,0	257	-257	408	441	-33	1695	776	920	1360	2218	-858
	%	0%	3%		6%	6%		23%	10%		18%	29%	
1975	тонны	0,0	181	-181	61	1193	-1132	2081	240	1840	892	1591	-700
	%	0%	3%		1%	18%		31%	4%		13%	24%	
1990	тонны	0,0	298	-298	228	176	52	721	585	135	856	1019	-163
	%	0%	5%		4%	3%		12%	10%		14%	17%	
1997	тонны	0,0	106	-106	591	220	371	565	1081	-517	1053	828	224
	%	0%	2%		11%	4%		10%	19%		19%	15%	
2000	тонны	0,0	207	-207	8,2	1047	-1039	1849	169	1681	751	1358	-607
	%	0%	4%		0%	21%		37%	3%		15%	27%	
ЦЕНТРАЛЬНЫЙ РАЙОН													
1974	тонны	257	269	-13	1268	916	351	2486	3687	-1202	4448	3637	811
	%	3%	3%		12%	9%		24%	35%		44%	35%	
1975	тонны	181	185	-4	2335	160	2175	862	4024	-3162	3107	2183	925
	%	2%	2%		28%	2%		10%	47%		37%	25%	
1990	тонны	298	265	32	461	482	-21	1674	1645	30	2182	2227	-45
	%	5%	4%		7%	8%		27%	26%		35%	35%	
1997	тонны	106	83	23	703	870	-167	2120	1618	502	2051	2392	-341
	%	2%	1%		11%	13%		33%	24%		32%	36%	
2000	тонны	207	232	-24	1288	836	452	2561	2806	-245	2935	3165	-230
	%	2%	3%		15%	10%		31%	33%		35%	37%	
НИЖНИЙ РАЙОН													
1974	тонны	292	0,0	292	612	899	-287	2093	2069	24	2648	2379	269
	%	4%	0%		8%	11%		27%	25%		34%	29%	
1975	тонны	213	0,0	213	157	1268	-1111	2028	833	1194	1588	1606	-18
	%	3%	0%		2%	19%		31%	12%		24%	24%	
1990	тонны	293	0,0	293	281	362	-81	1040	1169	-130	1488	1261	227
	%	6%	0%		5%	7%		20%	21%		28%	23%	
1997	тонны	91	0,0	91	335	534	-199	1204	1139	65	1453	1396	57
	%	2%	0%		7%	10%		24%	21%		30%	26%	
2000	тонны	250	0,0	250	959	249	710	976	2581	-1605	2547	1671	876
	%	4%	0%		15%	4%		15%	38%		39%	25%	

Приложение Е. Результаты сценарных модельных расчетов влияния уровня
режима водохранилищ в летний период на кислородные условия в них

а) Можайское водохранилище

Год	Н, м БС	Объем, млн м ³	Среднее значение за июнь-август				Максимальные за период июнь-август					
			ИК	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, млн м ³	Объем зоны O ₂ =0 мг/л, млн м ³	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, % от объема водохранилища	Объем зоны с O ₂ =0 мг/л, % от объема водохранилища	ИК	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, млн м ³	Объем зоны O ₂ =0 мг/л, млн м ³	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, % от объема водохранилища	Объем зоны с O ₂ =0 мг/л, % от объема водохранилища
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1975	183	234	4,2	55,2	27,4	24%	12%	5,7	103,1	63,7	44%	27%
	182	204	3,9	45,5	22,0	22%	11%	5,4	85,9	50,4	42%	25%
	181	176	3,6	36,1	16,8	20%	10%	5,3	72,0	40,5	41%	23%
	180	151	3,4	28,1	12,7	19%	8%	5,1	60,3	32,2	40%	21%
	179	128	3,1	20,8	8,9	16%	7%	4,7	45,4	23,5	35%	18%
	178	107	2,9	14,9	6,1	14%	6%	4,4	33,5	15,5	31%	14%
	177	89	2,6	10,4	4,0	12%	5%	4,0	24,5	9,9	28%	11%
1997	183	233	3,6	40,8	18,3	18%	8%	5,4	107,3	62,4	46%	27%
	182	205	3,6	31,7	13,7	15%	7%	5,6	90,2	52,5	44%	26%
	181	178	3,5	27,3	11,9	15%	7%	5,0	74,5	41,9	42%	24%
	180	152	3,3	22,9	9,8	15%	6%	4,9	63,4	35,9	42%	24%
	179	129	3,1	17,8	7,3	14%	6%	4,6	49,0	26,7	38%	21%
	178	109	2,9	13,8	5,5	13%	5%	4,4	36,5	19,7	34%	18%
	177	90	2,8	10,5	4,2	12%	5%	4,2	29,9	16,6	33%	18%
1990	183	235	2,8	18,3	4,6	8%	2%	4,6	63,8	25,8	27%	11%
	182	205	2,7	14,6	3,6	7%	2%	4,4	52,5	17,5	26%	8%
	181	178	2,6	11,6	3,0	7%	2%	4,2	41,3	15,6	23%	9%
	180	152	2,5	9,3	2,4	6%	2%	4,0	33,8	11,1	22%	7%
	179	130	2,3	7,6	2,0	6%	2%	3,8	26,9	9,0	21%	7%
	178	109	2,3	6,4	1,8	6%	2%	3,7	21,3	8,1	20%	7%
	177	90	2,1	5,0	1,4	6%	2%	3,5	17,0	6,2	19%	7%

Приложение Е (продолжение)

б) Рузское водохранилище

Год	Н, м БС	Объем, млн м ³	Среднее значение за июнь-август				Максимальные за период июнь-август					
			ИК	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, млн м ³	Объем зоны O ₂ =0 мг/л, млн м ³	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, % от объема водохранилища	Объем зоны с O ₂ =0 мг/л, % от объема водохранилища	ИК	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, млн м ³	Объем зоны O ₂ =0 мг/л, млн м ³	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, % от объема водохранилища	Объем зоны с O ₂ =0 мг/л, % от объема водохранилища
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1975	183	235	4,9	64,8	37,7	28%	16%	6,2	110,7	83,6	47%	36%
	182	203	4,7	56,9	34,0	28%	17%	6,1	94,2	72,7	46%	36%
	181	174	4,6	47,0	28,1	27%	16%	5,9	76,7	59,1	44%	34%
	180	146	4,3	38,4	22,9	26%	16%	5,8	62,0	43,6	42%	30%
	179	122	4,1	30,0	17,9	25%	15%	5,4	47,4	33,3	39%	27%
	178	100	3,8	22,6	13,5	23%	14%	5,0	34,7	23,6	35%	24%
	177	81	3,4	16,5	10,0	20%	12%	4,6	24,2	16,1	30%	20%
1997	183	235	4,0	48,0	25,9	20%	11%	5,7	109,0	71,4	46%	30%
	182	203	3,8	39,4	21,2	19%	10%	5,6	90,4	65,3	44%	32%
	181	174	3,7	33,6	18,5	19%	11%	5,4	74,1	53,2	43%	31%
	180	146	3,6	28,0	15,8	19%	11%	5,3	59,1	42,2	40%	29%
	179	122	3,5	23,4	12,9	19%	11%	5,1	51,6	30,8	42%	25%
	178	100	3,2	17,5	9,8	17%	10%	4,7	38,1	24,0	38%	24%
	177	81	2,8	12,4	6,4	15%	8%	4,2	23,6	14,4	29%	18%
1990	183	237	3,2	29,5	12,8	12%	5%	4,8	69,5	44,8	29%	19%
	182	204	3,1	24,4	10,1	12%	5%	4,6	57,2	33,3	28%	16%
	181	174	3,1	20,2	8,0	12%	5%	4,5	51,1	24,6	29%	14%
	180	147	2,7	13,8	5,1	9%	3%	4,2	40,2	16,1	27%	11%
	179	122	2,4	9,9	3,5	8%	3%	3,9	31,8	10,5	26%	9%
	178	101	2,1	6,3	2,2	6%	2%	3,5	23,6	6,9	23%	7%
	177	82	1,8	3,4	1,0	4%	1%	3,0	10,5	3,3	13%	4%

Приложение Е (продолжение)

в) Озернинское водохранилище

Год	Н, м БС	Объем, млн м ³	Среднее значение за июнь-август				Максимальные за период июнь-август					
			ИК	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, млн м ³	Объем зоны O ₂ =0 мг/л, млн м ³	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, % от объема водохранилища	Объем зоны с O ₂ =0 мг/л, % от объема водохранилища	ИК	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, млн м ³	Объем зоны O ₂ =0 мг/л, млн м ³	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, % от объема водохранилища	Объем зоны с O ₂ =0 мг/л, % от объема водохранилища
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1975	183	154	4,2	32,7	15,5	21%	10%	5,4	61,2	40,7	40%	26%
	182	131	4,2	29,7	14,5	23%	11%	5,4	52,2	33,7	40%	26%
	181	110	4,3	25,7	12,8	23%	12%	5,4	43,6	30,6	40%	28%
	180	93	4,2	21,9	11,2	24%	12%	5,3	39,3	23,9	42%	26%
	179	77	4,1	17,6	9,3	23%	12%	5,3	30,6	18,1	40%	23%
	178	64	4,0	14,1	7,5	22%	12%	5,1	23,9	17,0	37%	26%
	177	50	3,8	10,5	5,7	21%	11%	4,9	17,3	12,2	34%	24%
1997	183	147	3,5	21,7	7,5	15%	5%	5	51,2	28,8	35%	20%
	182	132	3,4	18,5	5,9	14%	4%	5	44,8	23,8	34%	18%
	181	110	3,5	16,4	5,5	15%	5%	5,1	39,5	23,4	36%	21%
	180	93	3,5	13,8	4,9	15%	5%	5,1	35,9	18,1	38%	19%
	179	78	3,5	11,6	4,2	15%	5%	5	28,1	17,0	36%	22%
	178	65	3,4	9,7	4,1	15%	6%	4,8	23,4	12,2	36%	19%
	177	51	3,2	7,0	3,4	14%	7%	4,6	18,1	8,2	35%	16%
1990	183	156	3,8	28,2	13,5	18%	9%	5,1	51,6	33,6	33%	21%
	182	133	3,7	22,9	10,7	17%	8%	4,9	42,4	25,4	32%	19%
	181	113	3,7	18,4	8,1	16%	7%	4,9	35,9	21,5	32%	19%
	180	95	3,6	15,0	6,2	16%	7%	4,8	26,7	17,3	28%	18%
	179	79	3,4	12,1	5,7	15%	7%	4,6	21,5	12,5	27%	16%
	178	65	3,1	9,3	4,5	14%	7%	4,4	18,1	8,2	28%	12%
	177	53	2,8	6,2	3,2	12%	6%	4,1	12,5	7,9	24%	15%

Приложение Е (продолжение)

г) Истринское водохранилище

Год	Н, м БС	Объем, млн м ³	Среднее значение за июнь-август					Максимальные за период июнь-август				
			ИК	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, млн м ³	Объем зоны O ₂ =0 мг/л, млн м ³	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, % от объема водохранилища	Объем зоны с O ₂ =0 мг/л, % от объема водохранилища	ИК	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, млн м ³	Объем зоны O ₂ =0 мг/л, млн м ³	Объем зоны с O ₂ <2 мг/л, % от объема водохранилища	Объем зоны с O ₂ =0 мг/л, % от объема водохранилища
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1975	170	180	3,8	28,6	6,0	16%	3%	5,3	63,0	28,3	35%	16%
	169	151	3,8	24,5	6,0	16%	4%	5,3	55,2	27,6	37%	18%
	168	126	3,8	21,6	6,2	17%	5%	5,3	47,1	25,1	37%	20%
	167	104	3,7	17,8	5,5	17%	5%	5,2	36,4	19,0	35%	18%
	166	86	3,6	14,4	4,3	17%	5%	4,9	27,9	17,0	33%	20%
	165	69	3,5	11,2	3,4	16%	5%	4,7	20,9	12,4	30%	18%
	164	55	3,3	8,1	2,7	15%	5%	4,5	15,4	9,4	28%	17%
1997	170	181	3,4	23,0	10,4	13%	6%	5,3	65,4	38,6	36%	21%
	169	150	3,1	18,0	8,2	12%	5%	5,1	53,1	32,6	36%	22%
	168	125	3,1	17,1	8,5	14%	7%	5	48,6	29,0	39%	23%
	167	103	3,1	14,7	7,8	14%	8%	4,9	39,7	24,1	38%	23%
	166	85	3,0	11,8	6,4	14%	8%	4,6	29,8	20,8	35%	24%
	165	69	2,9	9,5	5,4	14%	8%	4,5	21,7	15,4	32%	22%
	164	54	2,9	7,6	4,3	14%	8%	4,3	21,1	14,0	39%	26%
1990	170	183	4,2	37,5	15,9	21%	9%	5,2	62,1	38,5	34%	21%
	169	152	4,2	32,8	14,4	22%	9%	5,4	54,5	33,2	36%	22%
	168	127	4,1	26,9	12,2	21%	10%	5,2	43,9	25,3	35%	20%
	167	105	3,9	21,5	10,4	21%	10%	5,1	37,6	21,1	36%	20%
	166	86	3,5	16,0	7,9	19%	9%	4,7	28,3	15,6	33%	18%
	165	69	3,3	11,8	6,0	17%	9%	4,5	21,2	14,1	31%	20%
	164	55	3,1	8,8	4,5	16%	8%	4,3	15,6	10,1	28%	18%