

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

Географический факультет



На правах рукописи

556.114.2:556.55

ЕРИНА Оксана Николаевна

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

25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

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

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: **ДАЦЕНКО ЮРИЙ СЕРГЕЕВИЧ**
кандидат географических наук, доцент кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Официальные оппоненты: **ГАШКИНА НАТАЛЬЯ АНАТОЛЬЕВНА**
доктор географических наук, и.о. ведущего научного сотрудника ФГБУН Института геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского (г. Москва)

ЩЕГОЛЬКОВА НАТАЛИЯ МИХАЙЛОВНА
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института водных проблем Российской академии наук (г. Москва)

Ведущая организация: **ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (г. Москва)**

Защита состоится 03 декабря 2015 г. в 15 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 501.001.68 при Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, МГУ, географический факультет, 18 этаж, аудитория 1801.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, Ломоносовский проспект, 27, А8. Автореферат размещен на сайте географического факультета Московского государственного университета имени М. В.Ломоносова: www.geogr.msu.ru. Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим направлять по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, 1, МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, ученому секретарю диссертационного совета Д 501.001.68, e-mail: science@geogr.msu.ru, факс: +7 495 9328836.

Автореферат разослан « » октября 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор



Савенко В.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Содержание растворенного кислорода (РК) 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 нем кислород расходуется при биохимическом окислении органических веществ (ОВ) 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, при которых возникновение аноксии в придонных слоях – явление обычное.

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;
- усовершенствовать алгоритм расчета растворенного кислорода используемой модели;
- подготовить необходимую информацию для проведения модельных расчетов кислородного режима, провести подробную верификацию и калибровку модели, а также ее 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 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 источников коммунального водоснабжения

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 сотрудниками группы 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 особенностей 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.

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 ее рост, но не влияют на максимальный объем зоны, который определяется положением слоя температурного скачка и толщиной гипolimниона.

Личный вклад автора заключается в организации и проведении серии наблюдений за кислородным режимом на водохранилищах Москворецкой водной системы в период 2011–2014 гг., а также в обобщении данных наблюдений и самостоятельном проведении расчетов интегральных характеристик кислородного режима. Самостоятельно была проведена верификация кислородного блока модели ГМВ-МГУ, кислородный блок дополнен процессом поглощения кислорода донными отложениями, проведена калибровка коэффициентов модели и последующая валидация. Автором самостоятельно разработан комплекс сценарных и диагностических расчетов, позволивших количественно оценить влияние комплекса гидрологических факторов на формирование гипоксидной зоны в летний период.

Достоверность результатов исследования обусловлена тем, что работа выполнена на основе обработки надежного массива данных наблюдений за кислородным режимом водохранилищ Москворецкой системы водоснабжения г. Москвы. О достоверности результатов моделирования свидетельствует высокая сходимость рассчитанных величин с результатами полевых обследований, которая подтверждается статистическими критериями.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты использованы при мониторинге качества воды водохранилищ, 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 отраслевых институтов системы Федерального агентства по рыболовству для прогнозирования продуктивности водных объектов, для территориальных управлений Росрыболовства при разработке хозяйственных мероприятий, а также 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. Л.Е. Ефимовой 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.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, охарактеризована ее научная новизна и практическая значимость, даны сведения о методике и исходных материалах, использованных в работе, сформулирован предмет защиты.

В **главе 1 «Растворенный кислород в пресных водоемах»** рассматриваются факторы формирования кислородного режима в пресноводных водоемах, различные методы определения содержания растворенного кислорода в воде.

Кислородный режим водоемов формируется в результате воздействия множества факторов: гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических. Важнейшими процессами, формирующими

распределение растворенного кислорода, являются обмен с атмосферой, перенос кислорода в результате процессов внутреннего водообмена, 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 натурных и лабораторных экспериментов, сильно разнятся.

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.

В главе 2 «**Кислородный режим водохранилищ Москворецкой водной системы**» обосновывается выбор объектов исследования. Можайское, Рузское, Озернинское и Истринское водохранилища являются наиболее интересными для изучения кислородного режима, так как их глубоководность и замедленный водообмен способствуют ежегодному возникновению плотностной стратификации водной толщи.

Основные черты кислородного режима данных водоемов – преобладание в весенний и осенний периоды динамических процессов, приводящих к выравниванию содержания растворенного кислорода по вертикали. Наличие устойчивой плотностной стратификации летом приводит к прекращению обмена РК между эпилимнионом, где в это время активно вегетирует фитопланктон, что приводит к пересыщению поверхностных слоев кислородом, и гиполимнионом, где кислород расходуется на дыхание гидробионтов и окисление ОВ. В результате все это приводит к формированию обширной

бескислородной зоны, которая к концу лета может занимать весь гипolimнион. В зимний период с установлением ледостава прекращается обмен с атмосферой, и кислород в водоемах постепенно расходуется на окисление ОВ.

Для интегральной оценки кислородного режима рассматриваемых водоемов использовались различные показатели, главным образом объем гипоксидной водной массы и индекс кислорода (ИК), рассчитываемый как средневзвешенное по объему абсолютное отклонение содержания растворенного кислорода от концентрации насыщения:

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

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

Обнаружена тесная связь рассматриваемых показателей с гидрофизическими и продукционными условиями водоемов и выявлены различия в кислородном режиме как во внутригодовом, так и в межгодовом разрезе. Показано, что в последние 35 лет в водохранилищах произошло ухудшение кислородных условий в вегетационный период, выразившееся главным образом в увеличении объема гипоксидной водной массы (рисунок 1).

Оценки трофического статуса водохранилищ в дни съемок, полученные по значениям ИК в соответствии с разработанной градацией [Даценко, Ветрова, 2007], не обнаружили противоречий с опубликованными сведениями.

В главе 3 «Моделирование кислородного режима в долинных водохранилищах» приводится обзор подходов к моделированию режима растворенного кислорода в водоемах, рассматриваются модели, в которых присутствует переменная «растворенный кислород», обосновывается выбор в качестве инструмента исследования гидрологической модели водохранилища ГМВ-МГУ.

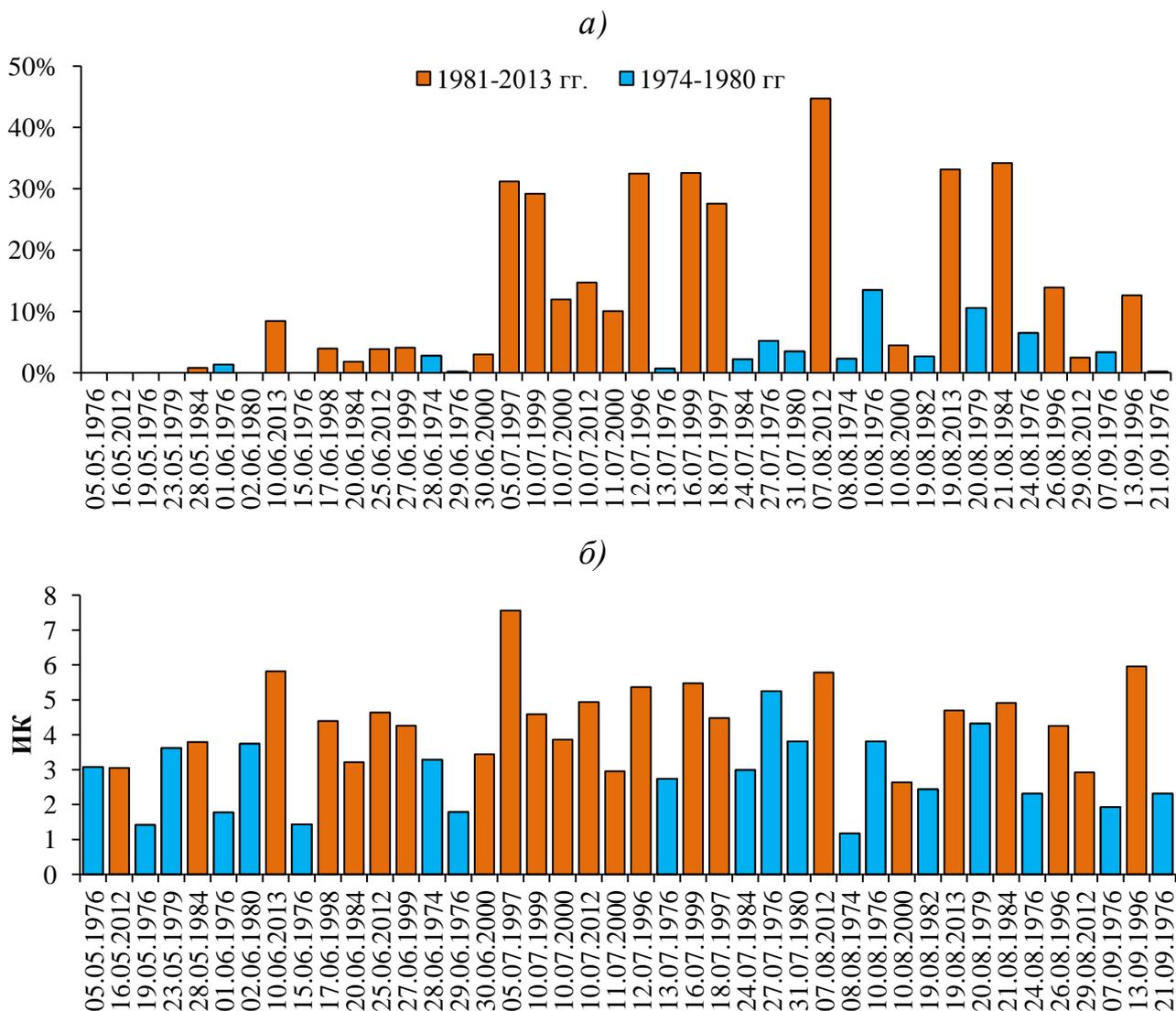


Рисунок 1 – Объем гипоксидной зоны с содержанием растворенного кислорода менее 2 мг/л в процентах от объема водохранилища (а) и индекс кислорода (б), рассчитанные по данным гидролого-гидрохимических съемок Можайского водохранилища в летний период

Обзор гидроэкологических моделей, в которых присутствует переменная «растворенный кислород», позволяет сделать вывод о том, что все они основаны на построении уравнения баланса кислорода с бóльшим или меньшим числом переменных. Наиболее полно учитывают специфику процессов, происходящих в водохранилищах, модели семейства CE-QUAL, а также квазидвумерная боксовая модель ГМВ-МГУ, которая в силу адаптированности для водохранилищ Москворецкой водохозяйственной системы выбрана

в качестве инструмента исследования. Водохранилище в данной модели представляется в виде совокупности отсеков, разделенных на горизонтальные боксы, к каждому из которых последовательно применяется алгоритм расчета вертикальной структуры водоема. Сначала производится расчет химико-биологической трансформации параметров качества воды, а затем – их изменения в результате протекания процессов внутреннего водообмена. Расчетные шаги составляют 1 сутки по времени и 1 метр по глубине.

Схема связей растворенного кислорода – одна из самых сложных в экологическом блоке модели: в ней учитывается обмен с атмосферой, фотосинтез, дыхание гидробионтов, затраты на нитрификацию, окисление ОВ, восстановленных соединений железа и марганца и др.

Для расчетов по модели требуется информация о морфометрии всего водохранилища и каждого из его расчетных отсеков, на которые разделяется водоем, начальное распределение всех характеристик, а также текущая информация – среднесуточные значения метеорологических характеристик, расходов и характеристик воды притока, а также сбросов воды гидроузлами.

Важнейшим элементом адаптации модели к каждому водному объекту является ее верификация, калибровка и валидация – этапы проверки качества воспроизведения моделью режима растворенного кислорода. Количественная оценка качества моделирования производилась с использованием величины среднеквадратической ошибки расчета S и широко применяемого в гидроэкологическом моделировании индекса Тейла T , при значении которого менее 0,4 качество расчета считается хорошим:

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

где O_{2p} и $O_{2\phi}$ – фактическая и расчетная концентрации растворенного кислорода, n – длина ряда.

Верификация кислородного блока ГМВ-МГУ по данным гидролого-гидрохимических съемок Можайского водохранилища показала адекватность

воспроизведения кислородного режима водоема. При этом обнаружен недоучет процесса потребления РК грунтами дна, ввиду чего алгоритм модели им дополнен. В процессе работы выполнено по 3 калибровочных расчета для 1984 и 2012 расчетных лет: 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). Калибровочными расчетами установлены оптимальные значения скоростей потребления растворенного кислорода отложениями в водохранилищах Москворецкой системы водоснабжения г. Москвы, которые позволили существенно улучшить качество воспроизведения моделью вертикального распределения O_2 .

Таблица 1 – 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, n – длина ряда)

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

Валидация модели – количественная оценка сходимости результатов моделирования с данными наблюдений, не использовавшимися при верификации и калибровке, 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.

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 $\pm 1,9$ до $\pm 2,2$ мг/л при длине ряда n от 286 до 943 измерений. 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.

Полученные значения средней квадратической ошибки модельного расчета и индекса Тейла свидетельствуют о высоком качестве воспроизведения моделью ГМВ-МГУ режима растворенного кислорода во всех водоемах, что подтверждается и сравнением расчетных и фактических эпюр вертикального распределения содержания кислорода (рисунок 2).

Подробная верификация, калибровка и валидация кислородного блока гидрологической модели водохранилища ГМВ-МГУ позволила с уверенностью использовать данный инструмент для проведения диагностических и сценарных расчетов режима растворенного кислорода в рассматриваемых водохранилищах.

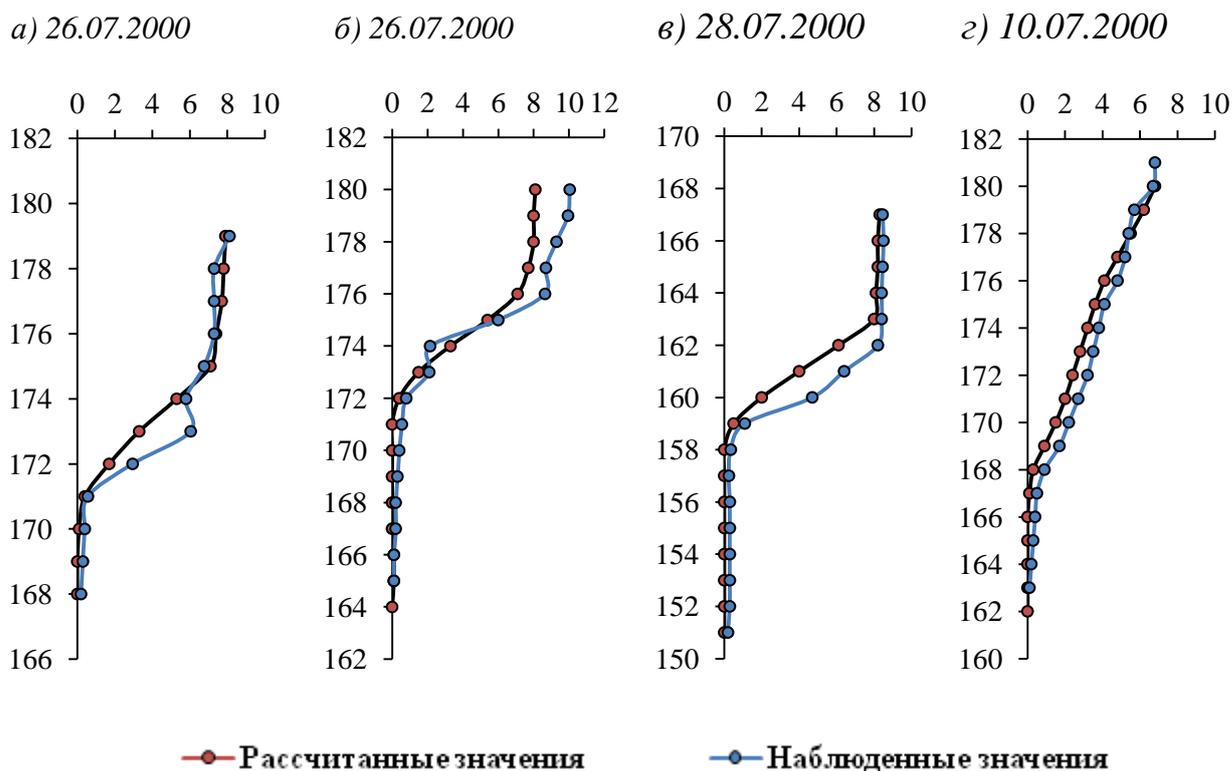


Рисунок 2 – Вертикальное распределение растворенного кислорода (мг/л) в центральном районе Рузского (а) и приплотинных районах Озернинского (б), Истринского (в) и Можайского (г) водохранилищ по результатам расчетов и данным наблюдений (по вертикальной оси – горизонт, м БС)

В главе 4 «Модельная оценка влияния гидрометеорологических условий на кислородный баланс и режим Москворецких водохранилищ» подробно рассматриваются различные аспекты режима растворенного кислорода в водохранилищах долинного типа с замедленным водообменом, предназначенных для питьевого водоснабжения г.Москвы.

Так, впервые подробно рассмотрена структура кислородного баланса Москворецких водохранилищ в летний и зимний периоды. Рассчитаны балансы кислорода во всем водохранилище и в отдельных его районах: верховом, центральном и приплотинном.

Как показали расчеты, в приходной части баланса полностью доминирует фотосинтез. В расходной части наиболее велик вклад дыхания фитопланктона, эвазии и затрат на окисление ОВ (таблица 2).

Таблица 2 – Диапазон величин составляющих кислородного баланса Можайского (М), Рузского (Р), Озернинского (О) и Истринского (И) водохранилищ в летний период по результатам диагностических модельных расчетов в 1974, 1975, 1990, 1997 и 2000 гг.

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	Затраты на нитрификацию	Окисление детрита	Дыхание зоопланктона	Окисление лабильного ОВ	Окисление стойкого ОВ	Окисление восстановленных веществ	Погребление грунтами дна	Дыхание рыб	
М	тонн	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	тонн	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	тонн	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	тонн	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%	

При анализе результатов расчетов установлено, что в структуре баланса кислорода различия между водохранилищами незначительны. Не претерпевает существенных изменений структура баланса и в зависимости от водности года.

Рассмотрение баланса кислорода по районам водохранилищ позволило оценить вклад течений в перенос кислорода внутри водохранилища.

Получено, 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 до 30–40% от приходной или расходной части кислородного баланса района. Однако наиболее важным результатом следует считать количественные оценки переноса РК плотностными течениями, с которыми в период существования стратификации водной толщи осуществляется 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 во многом определяется режимом регулирования стока гидроузлом. Единственной составляющей приходной части в балансе в это время являются речные воды. Структура расходной части также упрощается: 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.

При помощи модельных расчетов рассмотрены условия формирования и развития бескислородных зон в Москворецких водохранилищах летом, а также влияние водности года и погодных условий на этот процесс. Гипоксидная водная масса начинает формироваться в рассматриваемых водоемах в конце мая – начале июня. Сценарными расчетами показано, что интенсивность увеличения ее 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 (таблица 3). С увеличением водности года кислородные условия в водохранилищах в вегетационный период улучшаются.

Таблица 3 – Характеристики зон гипоксии и аноксии в водохранилищах Москворецкой водохозяйственной системы по результатам диагностического и сценарного (при возникновении жаркой погоды) 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

Регулирование уровня воды в летний период также оказывает существенное влияние на кислородный режим. В первую очередь это проявляется в увеличении водной массы с резким дефицитом кислорода с ростом уровня в Можайском и Рузском водохранилищах. В морфологически более сложных Озернинском и Истринском водохранилищах повышение уровня при прочих равных условиях не приводит к ухудшению кислородных условий (рисунок 3).

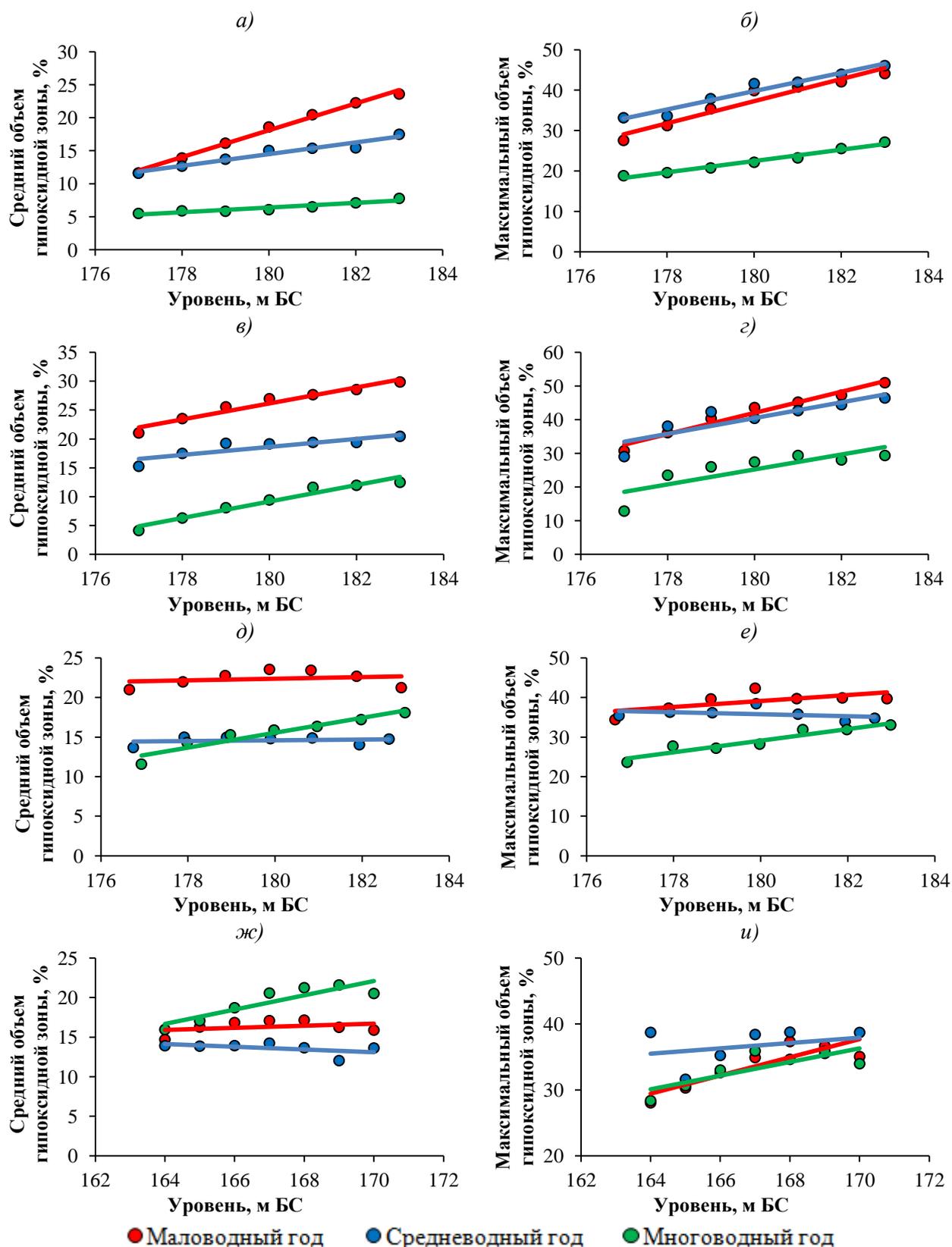


Рисунок 3 – Изменение среднего (а, в, д, ж) и максимального (б, г, е, и) объема зоны острой гипоксии (в % от объема всего водохранилища) с содержанием растворенного кислорода <2 мг/л по результатам сценарных расчетов в летний период при изменении уровня воды в Можайском (а, б), Рузском (в, г), Озернинском (д, е) и Истринском (ж, и) водохранилищах

В **заключении** перечислены основные результаты и сформулированы выводы исследования. К ним относятся следующие положения:

1. Проведенные расчеты интегральных показателей кислородного режима (запасов растворенного кислорода, объемов зон с острой гипоксией, индексов кислорода (ИК)) по данным наблюдений доказали их связь с параметрами устойчивости водной толщи. Полученные статистически значимые 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 применения ИК для сравнения кислородного режима в долинных водохранилищах.

2. Результаты верификации кислородного блока модели ГМВ-МГУ, учета в его алгоритме процесса поглощения кислорода донными отложениями, 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 показывают высокое качество воспроизведения кислородного режима гидрологической моделью водохранилища и обосновывают ее применение в качестве инструмента исследования изменчивости пространственных полей растворенного кислорода в водохранилищах.

3. При помощи диагностических модельных расчетов впервые установлен вклад различных составляющих в структуру кислородного баланса в разных районах водохранилищ в зимний и летний период, выявлена роль генетически различных течений воды 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 течения играют важнейшую роль в переносе кислорода слабопроточных долинных водохранилищах, особенно в период ледостава.

4. Впервые установлено, что 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 также, что летом при увеличении длительности жаркой погоды происходит увеличение продолжительности существования бескислородных условий и значительно возрастают скорости истощения запасов кислорода в гипolimнионе водохранилищ.

5. Модельными расчетами показано, что в Можайском и Рузском водохранилищах с ростом уровня воды летом следует ожидать существенное увеличение объема гипоксидной водной массы, что связано с увеличением доли гипolimниона в общем объеме водохранилищ. В то же время в более мелководных и морфологически сложных Озернинском и Истринском водохранилищах подобных изменений в кислородных условиях может и не быть.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК:

1. Даценко Ю.С., **Ерина О.Н.**, Пуклаков В.В., Эдельштейн К.К. Модельная оценка влияния внутриводоемных процессов на экологическое состояние стратифицированных водохранилищ // Вода: химия и экология, 2014, №9. С. 9–14.

2. **Ерина О.Н.** Прогностические оценки кислородного режима и качества воды в Можайском водохранилище в экстремально жаркую погоду // Вестник Московского университета. Серия 5: География, 2014, №6. С. 10–15.

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

В прочих изданиях:

1. Даценко Ю.С., **Ерина О.Н.**, Пуклаков В.В. Опыт имитационного моделирования кислородного режима стратифицированного водохранилища // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. II. Труды Международной научно-практической конференции. Пермь: изд-во ПГУ, 2011. С. 51–55.

2. **Ерина О.Н.** Моделирование кислородного режима водохранилищ Москворецкой водной системы // Бассейн Волги в XXI-м веке: структура и функционирование экосистем водохранилищ. Сборник материалов докладов участников Всероссийской конференции. Институт биологии внутренних вод, Борок. Ижевск: издатель Пермьяков, 2012. С. 67–69.

3. **Ерина О.Н.** Моделирование кислородного режима стратифицированного водоема // Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах. Материалы V Всероссийского симпозиума с международным участием. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. С. 152–156.

4. 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 Всероссийского симпозиума с международным участием. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2012. С. 379–382.

5. 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.

6. Даценко Ю.С., **Ерина О.Н.**, Пуклаков В.В., Соколов Д.И. Адаптация модели ГМВ-МГУ для расчета показателей качества воды в Учинском водохранилище // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. II. Труды Международной научно-практической конференции. Пермь: изд-во ПГУ, 2013. С. 53–57.

7. **Ерина О.Н.** Диагностические расчеты кислородного режима стратифицированного водохранилища в условиях малой водности. // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. II. Труды Международной научно-практической конференции. Пермь: изд-во ПГУ, 2013. С. 73–78.

8. Даценко Ю.С., **Ерина О.Н.**, Пуклаков В.В. Моделирование режима растворенного кислорода в стратифицированном водохранилище // Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз: материалы всероссийской научной конференции. Новочеркасск: изд-во «ЛИК», 2013. С. 309–314.

9. Эдельштейн К.К., Даценко Ю.С., Пуклаков В.В., Гречушникова М.Г., **Ерина О.Н.**, Соколов Д.И. Современная методика расчета формирования качества воды в водохранилищах централизованного водоснабжения // Вода Magazine, 2013, №6. С. 48–54.

10. **Ерина О.Н.** Возможные изменения кислородного режима Истринского водохранилища при наступлении экстремально жаркой погоды // Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменяющегося климата: материалы Международной научной конференции. Минск: издательский дом БГУ, 2015. С. 77–79.

11. **Ерина О.Н.** Многолетняя и внутригодовая изменчивость индекса кислорода в водохранилищах Москворецкой водной системы // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Т. II. Труды Международной научно-практической конференции. Пермь: изд-во ПГУ, 2015. С. 53–56.

12. **Ерина О.Н.** Модельная оценка составляющих кислородного баланса Можайского водохранилища в летний период // Материалы научной конференции «Современные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод». Ч. 2. Ростов-на-Дону, 2015. С. 357–361.