

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Терешина Мария Алексеевна

**Водный и термический режим водоемов Московского региона
в условиях изменяющегося климата**

1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена на кафедре гидрологии суши
географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель – ***Ерина Оксана Николаевна,***
кандидат географических наук

Официальные оппоненты – ***Степаненко Виктор Михайлович,***
доктор физико-математических наук,
зам. директора Научно-исследовательского
вычислительного центра МГУ

Ясинский Сергей Владимирович,
доктор географических наук, ведущий
научный сотрудник лаборатории гидрологии
Института географии РАН

Здоровеннова Галина Эдуардовна,
кандидат географических наук, старший
научный сотрудник лаборатории гидрофизики
Института водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН

Защита диссертации состоится «15» мая 2025 г. в 17 часов на заседании диссертационного совета МГУ.016.2 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы д. 1, ГЗ МГУ, Географический факультет, 18 этаж, ауд. 1801 (тел. +7(495)939-22-38, факс +7(495)932-88-36).

E-mail: Diss1102MSU@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3395>

Автореферат разослан « » апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор биологических наук

А.В. Ольчев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Состояние озерных экосистем и, как следствие, качество воды в них тесно связаны с особенностями термического режима и режима перемешивания (динамического режима), которые определяют интенсивность трансформации химических веществ, газовый режим, условия обитания гидробионтов и структуру трофических связей [Hellmann et al., 2008]. С отдельными особенностями термического и динамического режима водоемов связаны такие негативные явления, как формирование аноксии в придонных слоях водоемов, возникновение опасных вспышек «цветения» и эпизоды повышенных выбросов парниковых газов [Snorheim et al., 2017; Гречушникова и др., 2018; Mullin et al., 2020]. Это делает изучение термического режима водоемов важной научной и практической задачей.

К наиболее ярким проявлениям влияния глобального потепления на озера мира относятся сокращение продолжительности ледовых явлений, изменение структуры водного баланса (увеличение испарения с поверхности воды) и, как следствие, уровня режима, повышение температуры поверхностного слоя воды и изменения в динамическом режиме [Woolway et al., 2020]. При этом темп, а иногда и направленность этих изменений могут существенно различаться в различных регионах мира [Dokulil et al., 2006; Jeppesen et al., 2012; O'Reilly et al., 2015] и даже в пределах одной природной зоны [Winslow et al., 2017]. Поэтому для принятия оптимальных решений в сфере управления водными ресурсами озер важно иметь оценки возможных будущих изменений их режима, составленные на региональном и локальном уровнях. Для Москвы и Московской области подобные количественные оценки могут иметь большое значение, так как уже сейчас термический режим и показатели стратификации оказывают влияние на качество воды в источниках питьевого водоснабжения [Веницианов, Кирпичникова, 2020].

Прогнозы будущего состояния озерных систем до конца XXI века в настоящее время включены в проект ISIMIP, в рамках которого разработана единая схема оценки влияния возможных будущих изменений климата на различные компоненты земной системы по климатическим сценариям, разрабатываемым МГЭИК [Golub et al., 2022]. Благодаря использованию в данной работе подходов, принятых в этом проекте, ее результаты в перспективе позволят сравнить направленность и интенсивность изменений в водоемах Московского региона и в водных объектах других частей земного шара.

Степень разработанности темы исследования. Темпы современных изменений в гидрологическом режиме озер оценены в ряде работ как регионального, так и глобального охвата [Carrea, Merchant, 2019; Sharma et al., 2019; Woolway et al., 2020]. Для российских водоемов опубликованы такие оценки по данным государственного мониторинга [Научно-прикладной..., 2021] и ряд научных работ, в которых детально описываются результаты влияния изменений климата на режим крупнейших российских озер [Шимараев и др., 2019; Современное состояние..., 2021], а также малых озер Севера Европейской территории России (ЕТР) [Филатов и др., 2014; Пальшин, Ефремова, 2016; Здоровеннова и др., 2022] и некоторых других регионов [Обязов, 2011; Вуглинский, 2014]. Из водоемов Москвы и Московской области сравнительно хорошо изучены только некоторые водохранилища [Пуклаков, Гречушникова, 2001], но даже для них отсутствуют современные детальные оценки интенсивности многолетних изменений термического режима.

Модельные оценки возможных будущих изменений опубликованы только для единичных российских озер [Сало, Назарова, 2004; Климат Карелии..., 2004; Rukhovets, Filatov, 2010; Выручалкина и др., 2016]. В проекте ISIMIP к настоящему времени участвуют только два российских водоема: оз. Вендюрское (респ. Карелия) и Можайское водохранилище (Московская область) [Golub et al., 2022]. При этом Можайское водохранилище представлено в упрощенном виде, не учитывающем реальный водный баланс и внутригодовую изменчивость уровня воды, оказывающую сильное влияние на термический режим водохранилища.

Целью настоящей работы является характеристика водного и термического режима водоемов Московского региона по данным инструментальных наблюдений и получение количественных оценок их изменения в течение XXI века в соответствии с международно принятыми сценариями ожидаемых климатических изменений.

Задачи работы:

- 1) Оценка современного водного и термического режима водоемов Московского региона и интенсивности их климатически обусловленных изменений по данным наблюдений;
- 2) Оценка применимости сеточных источников метеоданных (реанализов, климатических моделей) в качестве входных данных для лимнологической модели;
- 3) Адаптация, калибровка и верификация лимнологической модели для выбранных водоемов;

- 4) Проведение серии сценарных расчетов по протоколу ISIMIP3b;
- 5) Анализ возможной реакции водного и термического режима водоемов на ожидаемые климатические изменения.

Объект и предмет исследования. В качестве объектов исследования выбраны четыре разнотипных водоема Москвы и Московской области, исторически наиболее хорошо изученные с точки зрения водного и термического режима. Озера Глубокое (Рузский район) и Белое (г. Москва) являются сравнительно глубокими (до 30 м и 15 м соответственно) естественными димиктическими водоемами. Оз. Святое (г. Москва) – мелководное (до 3 м) полимиктическое озеро. Можайское водохранилище (Можайский район) – водохранилище долинного типа, осуществляющее внутригодовое и межгодовое регулирование стока, с глубинами до 22 м.

Предметом исследования являются характеристики водного и термического режима – величины составляющих водного баланса водоемов, уровни воды, температура воды на разных глубинах, даты установления и разрушения ледяного покрова, параметры термической стратификации и их сезонные и многолетние изменения.

Материалы и методы исследования. В качестве источников информации о водном, ледовом и термическом режиме исследуемых водоемов за исторический период использовались данные, опубликованные в монографиях и трудах гидробиологической станции на оз. Глубоком и Косинской лимнологической станции, архивные данные станции на оз. Глубоком с 1991 года и Красновидовской лаборатории по изучению водохранилищ (в настоящее время – Красновидовская учебно-научная база, далее УНБ) с 1967 года. Современный термический режим водоемов был исследован путем проведения круглогодичных ежемесячных ручных наблюдений и установки буйковых станций с температурными логгерами в теплое время года начиная с 2018–2021 гг. Синоптические условия за исторический период оценивались по архивам наблюдений на метеостанциях, данным измерений автоматической метеостанции на оз. Глубоком и данным реанализа ERA5. Сценарии возможных будущих изменений климата по ансамблю моделей CMIP6 получены из открытого репозитория проекта ISIMIP [Lange et al., 2022].

Для воспроизведения современного и возможного будущего водного и термического режима выбранных водоемов использовалась одномерная модель гидротермодинамики озер GLM (General Lake Model), разработанная в Австралии и входящая в ансамбль моделей озерного сектора проекта ISIMIP [Bruce et al., 2018].

Для работы с моделью, расчета гидрофизических характеристик, статистической обработки и визуализации результатов использовались открытые библиотеки функций языка R: *glm3r*, *glmtools*, *FME*, *rlakeanalyzer*, *ggplot2* и другие.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

- для малых озер Москвы и Московской области собрана уникальная база данных натурных наблюдений за температурой воды, ледовыми явлениями и уровнем режимом, впервые описан современный термический режим и проведена статистическая оценка его изменений относительно данных начала–середины XX века;
- проведен анализ чувствительности лимнологической модели GLM к входным гидрометеорологическим данным и изменению калибровочных параметров, в результате чего обоснована авторская методика ее калибровки;
- даны первые оценки возможных будущих изменений режима водоемов умеренной зоны ЕТР по сценариям Шестого оценочного доклада МГЭИК;
- для Можайского водохранилища использованы модельные оценки ожидаемого притока воды и учтен сброс через сооружения гидроузла, что позволяет получить оценки, более приближенные к реальности, чем в случае задания постоянного уровня воды.

Научная и практическая значимость результатов. Благодаря применению схемы модельной оценки будущих изменений в режиме озер, принятой в мировом сообществе, полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы для сопоставления с направленностью и темпами будущих изменений в водоемах других регионов мира, что позволит оценивать влияние географических и местных факторов на динамику озерных систем в условиях изменяющегося климата. Разработанная схема оптимизации параметров модели GLM позволит упростить ее адаптацию для других объектов. Полученные количественные оценки возможных будущих изменений в ледовом, термическом и динамическом режиме водоемов Московского региона, а также выводы об их возможных экологических последствиях могут быть использованы для обоснования решений в сфере управления водными ресурсами региона.

Защищаемые положения:

1. В результате изменений регионального климата продолжительность ледостава на водоемах Московского региона к началу XXI века сократилась на 20–38 дней относительно начала и середины XX века, сдвинулись сроки наступления фаз весенней и осенней гомотермии, увеличилась максимальная температура воды и устойчивость летней стратификации.

2. Авторская методика автоматической адаптации лимнологической модели GLM позволяет с высокой достоверностью воспроизводить водный, термический и ледовый режим как малых озер Московского региона с различной морфометрией, так и долинного водохранилища.

3. К концу XXI века во всех рассматриваемых водоемах ожидается сокращение периода ледостава в среднем на 26–87 дней относительно современных условий и увеличение продолжительности летней стратификации на 13–45 дней. Для димиктических водоемов в отдельные годы возможен переход к мономиктическому типу. Для полимиктических озер возможно снижение частоты периодов полной циркуляции в течение теплого периода года.

4. Увеличение температуры воды в безледный период в стратифицированных водоемах в основном ограничивается поверхностными слоями воды (эпилимнионом) и может достигнуть 2,7–5,5 °С относительно средних современных значений. В полимиктических водоемах ожидается также увеличение придонной температуры воды. При всех сценариях изменений климата в рассматриваемых водоемах ожидается увеличение средней продолжительности периодов с температурой поверхностного слоя воды более 25 °С до 31–72 дней в году и учащение случаев прогрева воды до температуры более 30 °С.

Личный вклад автора. Автор принимала непосредственное участие в проведении полевых работ для изучения термического режима всех исследуемых водоемов начиная с 2018 года, а также в работах по оцифровке и анализу архивных данных. Вся работа по анализу чувствительности модели GLM, созданию алгоритма ее калибровки и адаптации к выбранным водоемам, а также все модельные расчеты выполнены автором лично. Также автором разработана методика расчета режима сбросов из водохранилища при заданных сценариях речного притока и создан программный код на языке R, позволяющий автоматизировать сценарные модельные расчеты, обработку и визуализацию их результатов.

Публикации. Результаты работы отражены в 7 публикациях, в том числе в 5 статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.016.2 по специальности 1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия.

Результаты работы использованы при выполнении проекта РФФИ № 18-35-00691-мол-а «Прогноз эвтрофирования малых озер при изменении климата», а также госзаданий кафедры гидрологии суши в 2016–2020 гг.

(«Гидрологический режим водных объектов суши в условиях изменения климата и антропогенного воздействия», номер ЦИТИС АААА-А16-116032810054-3) и в 2021–2025 гг. («Анализ, моделирование и прогнозирование изменений гидрологических систем, водных ресурсов и качества вод суши», номер ЦИТИС 121051400038-1).

Апробация результатов исследования. Результаты исследования были представлены в форме устных и стендовых докладов на всероссийских и международных научных конференциях: III Виноградовские чтения «Грани гидрологии», г. Санкт-Петербург, 2018 г.; VI Всероссийская конференция памяти Г.Г. Винберга, г. Санкт-Петербург, 2020 г.; ENVIROMIS-2022, г. Томск, 2022 г.; «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов», г. Пермь, 2023 г.; CITES-2023, г. Москва, 2023 г.; «Водные ресурсы в условиях глобальных вызовов: экологические проблемы, управление, мониторинг», г. Ростов-на-Дону, 2023 г.; Всероссийская научная конференция, посвященная 80-летию Института озераедения РАН «Лимнология в России», г. Санкт-Петербург, 2024 г.; GLEON 2024 Virtual All Hands' Meeting, США (онлайн), 2024 г.; VIII Всероссийский объединенный метеорологический и гидрологический съезд, г. Санкт-Петербург, 2024 г.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы, состоящего из 286 источников, включая 118 русскоязычных и 168 источников на английском языке. Общий объем диссертации – 210 страниц, основной текст изложен на 162 страницах и содержит 15 таблиц и 81 рисунок.

Благодарности. Автор благодарит сотрудников Красновидовской УНБ и всех причастных к ее работе, в особенности своего руководителя О.Н. Ерину, В.В. Пуклакова, М.Г. Гречушникову и Д.И. Соколова, за переданные знания о Можайском водохранилище и озерах в целом, включая результаты десятков лет полевых работ; научного руководителя гидробиологической станции на оз. Глубоком Н.М. Коровчинского за предоставленные архивные материалы и возможность работать на станции; Н.Д. Ахмерову, Н.К. Семенову, Г.В. Айзеля и Ю.А. Симонова за предоставленные результаты гидрологического моделирования притока воды к Можайскому водохранилищу; К. Пилипенко, Т. Пойменову, Е. Птицыну за помощь с оцифровкой и обработкой архивных данных по режиму Можайского водохранилища; а также своих друзей и товарищей, которые уже прошли путь к защите диссертации и дали множество ценных советов и веру в себя – Е. Панченко, В. Жихарева, В. Ломова и остальных.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1. Климатически обусловленные изменения гидротермодинамики водоемов

В разделе 1.1 описаны основные черты годового термического цикла водоемов умеренной зоны, приведены используемые в мировой лимнологии классификации озер по режиму перемешивания и температурному режиму. Описаны механизмы, определяющие связь термического и динамического режима с экологическим состоянием озер: влияние температуры воды на выживаемость водной биоты, растворимость газов, скорость химического и биохимического окисления химических веществ, влияние продолжительности периодов ледостава и стратификации на водный баланс, кислородный режим и режим внутриводоемной циркуляции биогенных элементов. Обобщены количественные показатели, используемые для параметризации термического режима водоемов: даты перехода температуры воды через граничные значения (4 °C, 10 °C) как косвенные характеристики режима перемешивания, количественные критерии наличия и отсутствия стратификации, показатели теплозапаса и гидродинамической устойчивости.

В разделе 1.2 рассматриваются механизмы влияния климатических и гидрологических факторов на термический режим водоемов. В качестве предикторов для определения характеристик термического режима озер могут использоваться температура воздуха и даты ее перехода через граничные значения, скорость ветра, индексы крупномасштабных атмосферных циркуляций. Гидрологические условия на водосборе оказывают влияние на уровеньный режим водоемов, оптические свойства воды, внутренний водообмен. На закономерности, связанные с географической зональностью, накладываются местные факторы: морфометрия озерных котловин, содержание растворенных и взвешенных веществ, структура водного баланса.

Раздел 1.3 посвящен обзору наблюдаемых современных изменений в водном, ледовом, термическом, динамическом режиме водоемов России и мира, а также существующих прогнозов его возможного дальнейшего развития. Уровеньный режим водоемов в различных регионах мира изменяется в разном направлении: для аридных зон в целом характерно еще большее снижение увлажненности территории, в то время как приток воды в водоемы гумидной зоны, в особенности в районах современного оледенения, может вырасти [Smith et al., 2005; Cardille et al., 2009; Coppens et al., 2020]. Для российских водоемов в основном характерно повышение уровня воды в многолетнем разрезе [Научно-прикладной..., 2021].

Глобальный обзор данных *in situ* наблюдений за температурой воды озер мира за 1985–2009 гг. показал средний темп увеличения температуры поверхностного слоя воды 0,34 °C/10 лет [O'Reilly et al., 2015]. По более широкому обзору, включившему результаты спутниковых наблюдений и модельных расчетов, средний темп увеличения температуры поверхности озер мира составил 0,24 °C/10 лет за период 1981–2020 гг. [Tong et al., 2023]. Для придонных горизонтов озер может отмечаться как увеличение температуры воды, так и ее снижение [Dokulil et al., 2006; Jeppesen et al., 2012]. Средняя температура поверхности воды озер России за май–октябрь в последние 40 лет повысилась на 0,5–1,9 °C по сравнению с предыдущим периодом [Научно-прикладной..., 2021].

Основной тенденцией для глубоководных озер умеренной зоны в настоящее время является усиление летней стратификации и увеличение ее продолжительности, а в дальнейшем ожидается сокращение или исчезновение периода зимней стратификации [Woolway, Merchant, 2019]. Для мелководных озер, характеризующихся в современный или исторический период полимиктическим режимом, учащаются периоды устойчивой стратификации [Dokulil et al., 2010; Piccioni et al., 2021].

Даты замерзания озер Северного полушария за период 1855–2019 гг. сдвигаются на более поздние сроки со средней скоростью 11,6 дня/100 лет, а освобождение водоемов ото льда происходит раньше в среднем на 8,1 дня/100 лет [Woolway et al., 2020]. За последнее столетие примерно для 15 тысяч озер в Северном полушарии устойчивый ледостав перестал наблюдаться ежегодно, и в отдельные годы озера перестали замерзать [Sharma et al., 2019]. Ожидаемые будущие темпы сокращения продолжительности ледостава даже при глобальном потеплении климата на 1,9 °C к 2100 г. изменяются в пределах от –2 дней/10 лет (Скандинавия, Исландия) до –4,5 дня/10 лет (Канадский архипелаг) [Huang et al., 2022].

Глава 2. Водный и термический режим водоемов Московского региона и их наблюдаемые изменения

В разделе 2.1 приведены средние многолетние характеристики климата Московского региона, показана однородность их распределения по территории. Из 1600 озер и 12 крупных водохранилищ Москвы и Московской области хорошо изученными с точки зрения термического режима являются только единичные водоемы. Из озер к ним относятся оз. Глубокое в Рузском районе и Косинские озера (Белое, Черное и Святое) на востоке г. Москвы, термический

режим которых в начале и середине XX века изучался сотрудниками гидробиологической станции на оз. Глубоком и Косинской лимнологической станции. Наиболее масштабные комплексные исследования водохранилищ региона во второй половине XX века проводились лабораторией по изучению водохранилищ МГУ имени М.В. Ломоносова, основным объектом изучения которой является Можайское водохранилище. Эти наиболее изученные водоемы региона и выбраны в качестве объектов данного исследования.

Раздел 2.2 посвящен описанию географического положения и основных характеристик (табл. 1) выбранных водоемов. По динамическому режиму Можайское водохранилище и озера Белое и Глубокое являются димиктическими, оз. Святое – полимиктическим, водоемы также значительно отличаются по размерам и форме котловин.

Таблица 1. Основные характеристики водоемов–объектов исследования

Характеристика	оз. Глубокое	Можайское вдхр.	оз. Белое	оз. Святое
Площадь зеркала, км ²	0,59	30,7*	0,29	0,09
Площадь водосбора, км ²	25,9	1360		
Объем воды, млн м ³	5,5	235*	1,27	0,18
Максимальная глубина, м	30	22,1*	17	3,5
Средняя глубина, м	9,3	7,7*	4,6	1,8
Длина береговой линии, м	3414	119000	2200	1200
Максимальная длина, м	1200	28000	705	370
Максимальная ширина, м	850	2600	595	335
Средняя ширина, м	494	1100	410	245
Сезонный размах колебаний уровня, м	до 0,6	до 8	до 0,6	до 0,6
Коэффициент водообмена, год ⁻¹	~0,1	1,8	~0,2	~0,8-0,9

* Морфометрические характеристики Можайского вдхр. приведены при НПУ.

В разделе 2.3 описан объем имеющихся данных, по которым проанализирован водный и термический режим исследуемых водоемов за исторический период. К ним относятся опубликованные результаты работ на озерах за период до 1964 г. [Россолимо, 1930; Кузнецов, 1934; Богословский, 1951; Щербаков, 1967], архивные материалы Красновидовской УНБ о режиме

Можайского водохранилища за период с 1967 г. и данные мониторинга, проводимого в 2018–2023 гг. сотрудниками Красновидовской УНБ на всех четырех водоемах. По этим данным описан современный термический режим водоемов и выделены происходящие изменения.

Для всех водоемов даты замерзания за период наблюдений (с 1920-х гг. по настоящее время) сдвигаются на более поздние, а таяния – на более ранние сроки (рис. 1). Для Можайского водохранилища, где даты формирования и разрушения ледяного покрова фиксировались ежегодно с 1961 года, даты замерзания за этот период сдвигаются в среднем на 3,6 дня позже за каждые 10 лет, а вскрытие происходит раньше в среднем на 1,4 дня/10 лет.

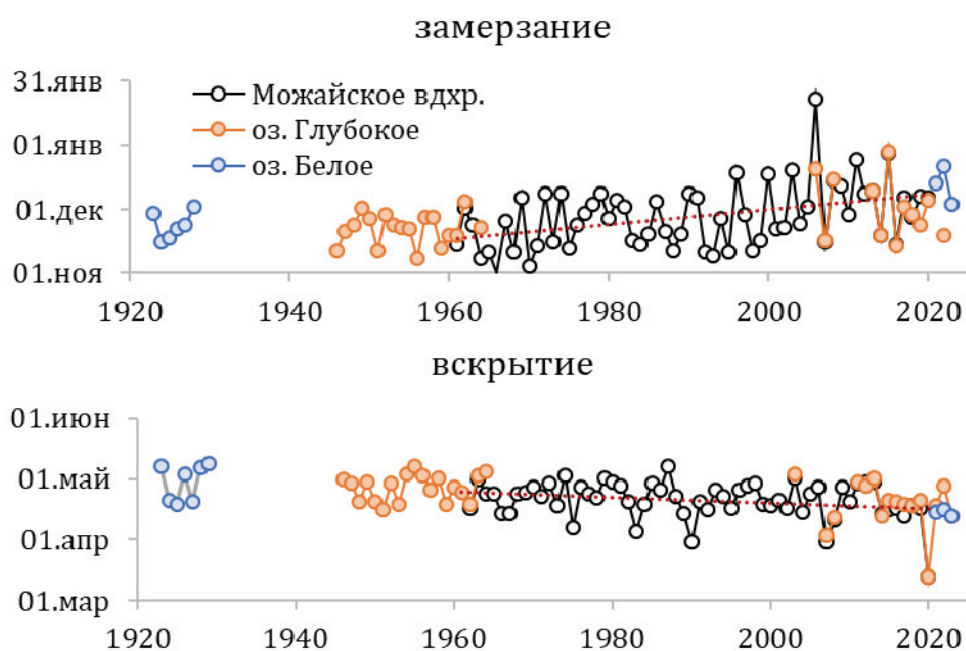


Рисунок 1. Изменение дат замерзания и вскрытия исследуемых водоемов за период наблюдений. Пунктиром показана линия линейного тренда для Можайского водохранилища

Весенняя гомотермия в озерах в начале–середине XX века наступала во второй половине апреля или начале мая. В современный период (по данным 2018–2023 гг. для озер и 2012–2023 гг. для Можайского водохранилища) она начинается раньше, еще до середины апреля, при этом в оз. Глубоком и Можайском водохранилище стратификация устанавливается при такой же температуре воды, как и в середине XX века (5–6 °C и 7–8 °C), а в оз. Белом весенняя циркуляция развивается очень ограниченно и заканчивается уже по достижении 4 °C, в результате чего температура воды в гипolimнионе летом оказывается на 3–10 °C ниже, чем отмечалось в 1923–1929 гг. Осенняя гомотермия в современных условиях наступает позже (в середине октября–

первой половине ноября) и при более низкой температуре воды, чем отмечалось в период до начала климатических изменений. В оз. Глубоком температура воды в гипolimнии зимой оказывается выше, чем в 1932–1933 гг., разница достигает 2,5 °С.

Для максимальной температуры воды и общих черт годового хода теплозапаса также заметны отчетливые изменения. Так, в 1910–1946 гг. максимальный теплозапас оз. Глубокого составлял 260–325 ТДж, что соответствует средневзвешенной температуре 11,5–14,3 °С. В 2018–2023 гг. значения этих показателей составляли уже 308–365 ТДж и 13,6–16,1 °С соответственно (изменения значимы на уровне $p < 0,001$) (рис. 2). Максимальная измеренная температура поверхности воды в оз. Белом в начале XX века составляла 20,5–23,6 °С, в оз. Глубоком в середине века – 26–28 °С. В 2018–2023 гг. максимальная температура воды оз. Белого составляла 24,6–26,5 °С, оз. Глубокого – 23,6–28,8 °С. В Можайском водохранилище максимальная измеренная температура поверхности воды в 1961–2000 гг. составляла 19–28 °С, в 2012–2023 гг. – 22,7–29,7 °С.

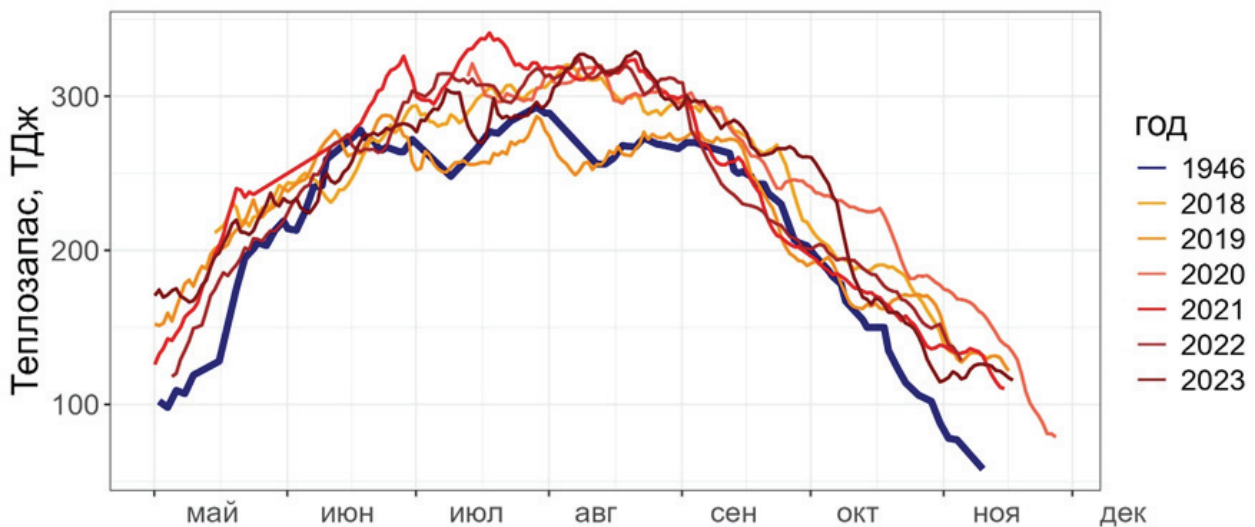


Рисунок 2. Внутригодовой ход теплозапаса оз. Глубокого в 1946 г. по данным Б.Б. Богословского [1967] и в 2018–2023 гг. по данным Краснови́довской УНБ

Среднее за лето положение слоя температурного скачка в димиктических водоемах, по-видимому, не претерпело значительных изменений, однако вертикальный градиент температуры воды и, следовательно, устойчивость стратификации в современный период увеличились. Для полимиктического оз. Святого увеличилась разница между температурой поверхностного и придонного слоев воды: в 1923–1929 гг. она обычно не превышала 6 °С, только в дном случае составив почти 10 °С; максимальная зафиксированная

температура воды за летний период в придонном горизонте составляла в разные годы 15,4–17,9 °С, в поверхностном слое – до 22,8 °С. В современный период максимальная температура поверхности воды составляет 25,1–25,9 °С, придонная температура – 18,9–23,9 °С, разница между ними в течение лета достигает 4,9–11,4 °С.

Для Можайского водохранилища при незначимых трендах межгодовых изменений общего объема притока и сброса воды отмечается изменение внутригодового режима притока воды: в первое десятилетие после заполнения водохранилища в среднем 70% воды приходило с половодьем и только 17% – с паводками, но в последнее десятилетие их вклад почти сравнялся – в среднем 40 и 34% общего притока воды соответственно. По данным ежегодных гидрологических съемок водохранилища в июле значимый линейный тренд выделен только для устойчивости водной толщи, но не для температуры поверхностного и придонного слоев воды.

Средние характеристики термической стратификации за летний период для исследуемых водоемов возможно выделить только по данным автоматических измерений, начатых с 2018–2021 гг. Имеющиеся данные наблюдений за многолетний период не позволяют дать статистически достоверные количественные оценки всех происходящих климатически обусловленных изменений в характеристиках термического режима выбранных водоемов (продолжительности стратификации, средней температуре воды, устойчивости и т.д.), что определяет необходимость применения для этих задач методов математического моделирования.

Глава 3. Моделирование гидротермодинамического режима озер и водохранилищ

Третья глава посвящена математическому моделированию термического режима водоемов суши. В разделе 3.1 описаны существующие подходы к моделированию гидротермодинамики озер и водохранилищ и приведен краткий обзор применяемых в данный момент лимнологических моделей. При выборе модели для данного исследования учитывалась принятая в современной лимнологии схема получения модельных оценок возможных будущих изменений по протоколу ISIMIP. В озерный сектор ISIMIP в настоящее время входят восемь лимнологических моделей, из которых использованная в диссертации модель GLM характеризуется высоким качеством воспроизведения реальных термических характеристик и эффективно воспроизводит ледовый режим озер [Golub et al., 2022].

В разделе 3.2 описана структура модели GLM, приведены ее основные расчетные уравнения. Описание динамики воды в озере в GLM производится на основе подхода Лагранжа: озеро разбивается на определенное количество однородных по плотности слоев, являющихся контрольными объемами. Вертикальное перемешивание описывается по энергетическому принципу: в каждый момент времени рассчитывается доступная кинетическая энергия и энергия, необходимая для перемешивания. При наличии энергии, достаточной для преодоления разницы в плотности между смежными слоями, эти слои объединяются в один; таким образом модель воспроизводит процесс вертикального перемешивания. В расчетные формулы входит ряд эмпирических параметров, обычно используемых в качестве калибровочных: к ним относятся константы интенсивности различных видов перемешивания, аэродинамические коэффициенты переноса явного и скрытого тепла и импульса.

Раздел 3.3 посвящен анализу чувствительности модели к калибровочным параметрам и используемым входным данным, а также адаптации модели к выбранным водоемам. Для оценки влияния метеорологических данных на качество воспроизведения термического режима был проведен численный эксперимент на примере оз. Глубокого. В качестве источников метеоданных использовались: автоматическая метеостанция, установленная на берегу озера; метеостанция в г. Можайске (примерно в 40 км к юго-западу от озера); глобальные атмосферные реанализы NCEP/DOE Reanalysis II и 20CRv3-ERA5. Наименьшая ошибка расчета (RMSE 0,8–2,0°C, NSE >0,7 при разных вариантах калибровки) была получена при использовании данных метеостанции в г. Можайске, дополненных данными о радиации из реанализов. При этом использование только данных реанализов позволило достичь почти такого же высокого качества воспроизведения термического режима, что показывает их применимость для данной задачи.

Анализ чувствительности модели к калибровочным параметрам показал, что из всех входящих в состав модели эмпирических констант наибольшее влияние на итоговую ошибку расчета оказывают параметры, связанные с ветровым перемешиванием (поправочный коэффициент к скорости ветра и параметры, связанные с описанием энергии ветрового воздействия), а также поправочные множители к температуре воздуха и потокам солнечной радиации, позволяющие увеличить репрезентативность исходных метеоданных для условий водоема, и коэффициент экстинкции солнечной радиации. Изменение в ходе калибровки модельных констант интенсивности других

типов перемешивания оказывает гораздо меньшее влияние на качество моделирования (по итоговой среднеквадратической ошибке расчета). Таким образом, было выполнено ранжирование модельных калибровочных параметров в зависимости от степени влияния на итоговую ошибку расчета температуры воды, используемое далее в процессе оптимизации параметров модели для выбранных водоемов.

В разделе 3.4 описываются результаты адаптации модели к выбранным водоемам. В результате автоматической калибровки и верификации модели удалось достичь высокого качества воспроизведения термического, уровня и ледового режима исследуемых водоемов (табл. 2).

Таблица 2. Периоды калибровки и верификации модели GLM для исследуемых водоемов, величина среднеквадратической ошибки расчета (RMSE) и критерия Нэша–Сатклиффа (NSE)

Параметр	оз. Глубокое	Можайское вдхр.	оз. Белое	оз. Святое
Период калибровки (количество точек данных)	2018–2020 ($n = 6431$)	2020–2023 ($n = 4812$)	2022–2023 ($n = 1026$)	2022–2023 ($n = 809$)
Период верификации (количество точек данных)	2021–2023 ($n = 4926$)	1984–2019 ($n = 992$)	2021 ($n = 500$)	2021 ($n = 230$)
RMSE (температура воды):				
– при калибровке	0,72 °C	1,92 °C	0,90 °C	1,15 °C
– при верификации	1,49 °C	1,87 °C	1,45 °C	1,19 °C
– весь период	0,80 °C	2,07 °C	1,10 °C	1,55 °C
NSE (температура воды):				
– при калибровке	0,99	0,89	0,98	0,92
– при верификации	0,98	0,91	0,94	0,97
– весь период	0,99	0,91	0,97	0,94
RMSE уровня воды	9 см	17 см	18 см	17 см
RMSE толщины льда	13 см	6 см	13 см	9 см

Глава 4. Изменения водного и термического режима водоемов Московского региона в XXI веке

В четвертой главе описываются результаты сценарных модельных оценок будущего режима четырех исследуемых водоемов до конца XXI века (на период до 2100 года). В ансамбль климатических моделей, данные которых

использовались как граничные условия, вошли модели GFDL-ESM4 (США), IPSL-CM6A-LR (Франция), MPI-ESM1-2-HR (Германия), MRI-ESM2-0 (Япония) и UKESM1-0-LL (Великобритания). Полученные результаты в тексте ниже приведены в виде средних значений между расчетами по разным климатическим моделям, если не указано иное.

Раздел 4.1 посвящен обзору и количественной оценке изменений климатических и гидрологических факторов формирования термического режима озер. Даже при наиболее «мягком» сценарии (SSP1-2.6) среднегодовая температура воздуха над исследуемой территорией Московского региона к середине XXI века (2041–2070 гг.) может увеличиться в среднем на 2,5 °С относительно значений 1981–2010 гг., после чего она по данным разных климатических моделей стабилизируется либо начинает слабо снижаться. При «среднем» сценарии SSP3-7.0 среднее увеличение температуры воздуха к концу века (2071–2100 гг.) составляет уже 5,2 °С, при «жестком» сценарии SSP5-8.5 – 6,3 °С. Также ожидается пропорциональное увеличение потоков длинноволнового излучения атмосферы (до 15% относительно современных значений) и небольшое увеличение потоков коротковолновой солнечной радиации (до 9%). Среднегодовая скорость ветра к концу века при сценарии SSP1-2.6 снижается на 3,1% относительно значений 1981–2010 гг., при сценарии SSP3-7.0 – снижается на 11%, а при сценарии SSP5-8.5 изменения незначительны и не достигают 1% от исходной величины.

Задание притока воды к Можайскому водохранилищу выполнялось по сценариям, полученным по результатам расчетов в гидрологической модели HBV Н.Д. Ахмеровой и др. [2023]. Расчет сбросов воды из Можайского водохранилища производился по разработанному алгоритму, реализующему расчет основных составляющих водного баланса и выбор сбросного расхода воды по диспетчерскому графику.

Полученные модельные оценки показывают небольшое увеличение притока воды к водохранилищу по всем климатическим сценариям в течение века со скоростью 2,9–4,6 млн м³/10 лет (уровень значимости $p < 0,05$). При «среднем» и «жестком» сценариях объем стока за половодье снижается в среднем соответственно на 5,5 млн м³/10 лет и 8,1 млн м³/10 лет (уровень значимости $p < 0,01$), меженный сток увеличивается в среднем на 11,3 и 20,7 млн м³/10 лет соответственно. Средний объем стока дождевых паводков в течение столетия сохраняется неизменным, однако существенно увеличивается его межгодовая изменчивость.

В разделе 4.2 описываются полученные количественные оценки возможных будущих изменений в режиме исследуемых водоемов. При сценарии SSP1-2.6 только для части водоемов отмечаются значимые тренды к более позднему замерзанию (в среднем на 0,8–1,2 дня/10 лет) и более раннему вскрытию (на 1,4–1,8 дня/10 лет). При «среднем» и «жестком» сценариях для обеих характеристик отмечаются значимые тренды во всех водоемах. При сценарии SSP1-2.6 к концу века продолжительность ледостава снизится на 26–33 дня относительно современных условий (1985–2014 гг.), при сценарии SSP3-7.0 – на 62–69 дней, при сценарии SSP5-8.5 – на 81–87 дней (рис. 3). При «среднем» и «жестком» сценариях также увеличится частота «безледных» зим: с середины столетия до половины всех лет (по данным различных климатических моделей) характеризуются отсутствием устойчивого ледяного покрова.

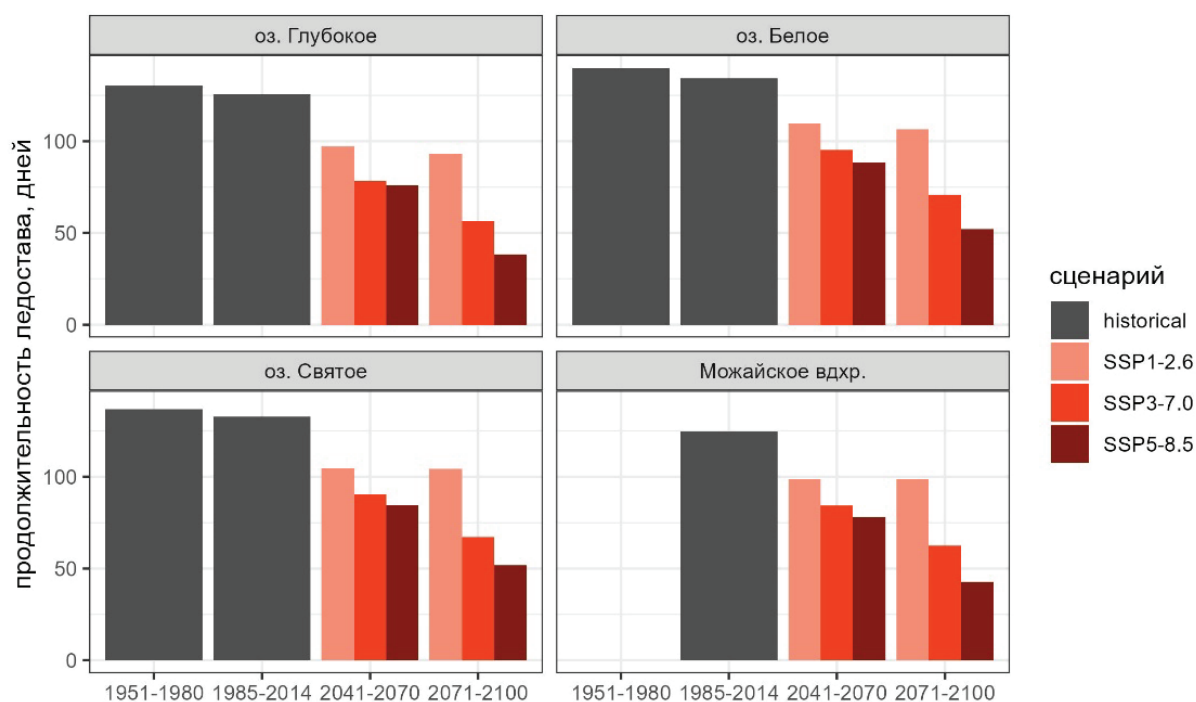


Рисунок 3. Изменение продолжительности ледостава на исследуемых водоемах в течение 1951–2100 гг. по различным климатическим сценариям

Сокращение периода ледостава сопровождается увеличением продолжительности летней термической стратификации. Уже при реализации сценария SSP1-2.6 продолжительность стратификации значимо увеличивается: на 13–17 дней к середине столетия, после чего сохраняется на почти постоянном уровне. При сценариях SSP3-7.0 и SSP5-8.5 продолжительность стратификации для озер Глубокое, Белое и Можайского водохранилища к концу века увеличивается на 36–41 день и 35–45 дней относительно

современных условий. Для полимиктического оз. Святого по «мягкому» сценарию суммарная продолжительность периодов, когда озеро находится в состоянии прямой температурной стратификации, к концу века увеличивается на 13 дней относительно современных условий, по «среднему» сценарию – на 30 дней, по «жесткому» сценарию – только на 12 дней (из-за большого разброса между расчетами по разным климатическим моделям). При этом количество событий формирования и разрушения стратификации в течение лета для оз. Святого изменяется слабо: как в исторический период, так и по большинству сценариев они происходят в среднем 7,4–8,3 раз в течение теплого периода года. Только при «жестком» сценарии разрушение стратификации происходит реже – в среднем 5,8–6,5 раз в год.

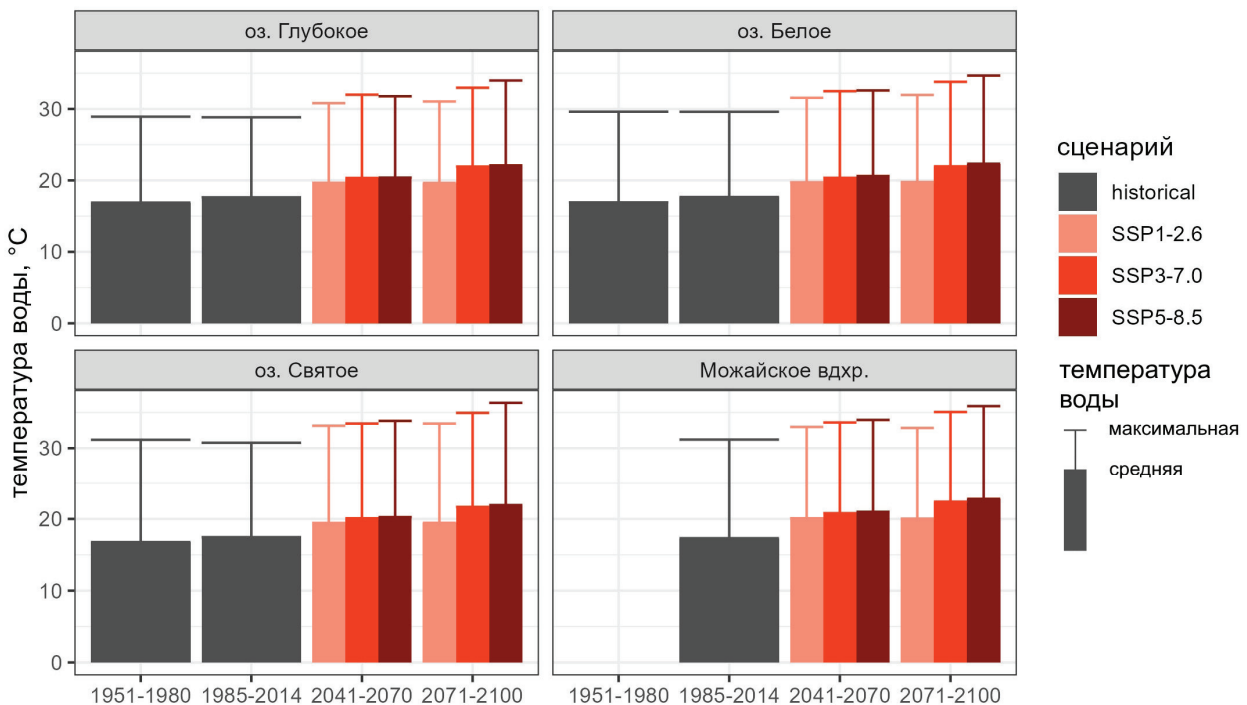


Рисунок 4. Изменение средней (за май–октябрь) и максимальной температуры поверхностного слоя воды исследуемых водоемов в течение 1951–2100 гг. по различным климатическим сценариям

Для температуры поверхностного слоя воды уже за исторический период отмечается статистически значимый тренд к увеличению (рис. 4). При «мягком» сценарии температура воды к концу века увеличивается в среднем на 2,0–2,7 °C относительно современных условий, при «среднем» сценарии – на 4,2–5,1 °C, при «жестком» сценарии – на 4,5–5,5 °C. Максимальная температура воды озер к концу века составляет 30,8–33,4 °C при «мягком» сценарии, 33,0–35,1 °C при «среднем» сценарии и 34,0–36,3 °C при «жестком» сценарии. Средний темп роста температуры поверхностного слоя воды в течение

рассматриваемого периода при сценарии SSP1-2.6 составляет 0,05–0,09 °C/10 лет, при сценарии SSP3-7.0 – 0,50–0,51 °C/10 лет, при сценарии SSP5-8.5 – 0,53–0,57 °C/10 лет. Для придонного слоя воды изменения в течение XXI века оказываются существенно менее выражены. Для озер Глубокого и Белого значимые изменения отмечаются только при «жестком» сценарии, в результате чего придонная температура увеличивается в среднем на 0,4 °C. Наиболее отчетливый линейный тренд отмечается для оз. Святого, где температура придонного слоя воды к концу века оказывается на 1,4–3,7 °C выше, чем в 1951–1980 гг.

Переход температуры воды через 4 °C весной по сценарию SSP1-2.6 в течение всего периода расчета происходит в среднем в конце марта – второй половине апреля (для оз. Святого – в марте), как и было характерно для условий современного климата. Но при сценариях SSP3-7.0 и SSP5-8.5 к концу века эти даты смещаются уже к началу марта или даже к февралю.

Продолжительность периодов с температурой поверхностного слоя воды более 25 °C в современных климатических условиях составляет для исследуемых озер в среднем 9–14 дней в году. При «мягком» сценарии к середине века она достигает уже 31–38 дней и сохраняется на схожем уровне до конца столетия. При «среднем» и «жестком» сценариях к середине века она увеличивается до 43–51 дней в году, а к концу века достигает уже 63–72 дней в году. Температура воды свыше 30 °C, в исторический период только эпизодически отмечавшаяся в исследуемых водоемах, к концу века при «мягком» сценарии достигается в среднем 1–2 дня в году, при «среднем» сценарии – 8–11 дней в году, при «жестком» сценарии – в среднем 12–17 дней в году. Положение сезонного слоя температурного скачка в течение XXI века по составленным сценарным оценкам меняется слабо (рис. 5). Все значимые изменения средней температуры воды приурочены в основном к эпилимниону, в более глубоких слоях изменения в течение столетия не превышают нескольких десятых градуса. Для оз. Святого ввиду отсутствия выраженного сезонного скачка и регулярного перемешивания в течение лета изменения отмечаются по всей глубине.

Для всех водоемов характерно также увеличение годового слоя испарения, составляющее при «мягком» сценарии 2,4–3,6 мм/10 лет, при «среднем» сценарии – 6,8–13,5 мм/10 лет, при «жестком» сценарии – 11,9–23,0 мм/10 лет. В первую очередь оно обусловлено повышенным испарением в летний период: в июне–августе увеличение месячных сумм испарения по различным сценариям достигает 15–30% от соответствующих значений в условиях современного

климата. Существенное увеличение слоя испарения отмечается также в весенний период (конец марта – середина апреля) за счет более раннего освобождения водоемов ото льда. Для глубоководных водоемов изменения в режиме осадков и испарения не несут значительных последствий для уровня и термического режима, но для мелководного оз. Святого в наиболее неблагоприятном случае возможно существенное обмеление (в отдельные годы более чем на метр относительно средних отметок). При «жестком» сценарии для оз. Святого отмечается стабильная тенденция к обмелению, к 2100 году уровень воды снижается на 30 см относительно средней современной отметки, в то время как для остальных водоемов изменения в уровне воды менее значительны.

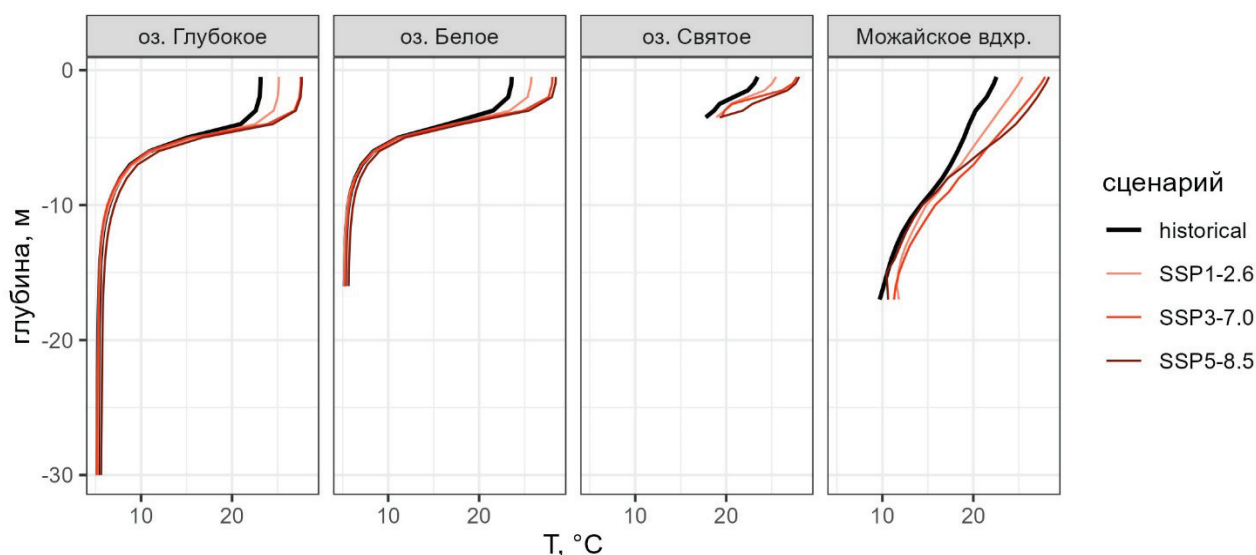


Рисунок 5. Осредненный температурный профиль исследуемых водоемов в июле в 1985–2014 гг. («historical») и в 2071–2100 гг. по различным сценариям

В разделе 4.3 рассмотрены возможные экологические последствия ожидаемых изменений в термическом режиме водоемов: изменения кислородного режима придонных слоев во время зимней обратной и летней прямой стратификации, круговорота биогенных элементов и их доступности для фитопланктона, возможное увеличение частоты возникновения эпизодов «цветения» сине-зеленых водорослей.

В **Заключении** перечислены основные результаты проведенного исследования и сформулированы выводы:

– Доступные данные наблюдений на наиболее изученных водоемах Москвы и Московской области позволяют сделать вывод о статистически значимом сдвиге дат замерзания и вскрытия водоемов, которое уже привело к сокращению периода ледостава более чем на месяц относительно первой

половины XX века. Для всех озер также отмечается увеличение максимальных зафиксированных температур воды. Другие изменения могут по-разному проявляться в разнотипных водоемах: для оз. Белого отмечается сильное сокращение периода весенней циркуляции, вызывающее снижение температуры воды в гипolimнии летом, для оз. Глубокого за счет менее интенсивного охлаждения в осенний период отмечается увеличение температуры воды в гипolimнии зимой. Для Можайского водохранилища из-за неоднородности рядов данных не удастся выделить статистически значимых трендов, за исключением увеличения устойчивости водной толщи в летний период.

- Водоемы Московского региона обеспечены данными наблюдений за температурными условиями на уровне, недостаточном для подробной оценки их современного режима. Даже при наличии ежемесячных наблюдений за температурным распределением трудно судить о средней и максимальной температуре воды за летний период и год, датах установления и разрушения температурной стратификации. Только наличие высокочастотных (ежесуточных) логгерных наблюдений позволяет отследить все ключевые этапы годового термического цикла.

- Анализ чувствительности модели к входным данным показал, что прямое задание потоков коротковолновой и длинноволновой радиации заметно улучшает воспроизведение термического режима озера, за счет чего использование данных глобальных реанализов является одним из наиболее эффективных способов задания граничных метеоусловий. По результатам анализа чувствительности к калибровочным параметрам выделены группы параметров, оказывающие наибольшее влияние на качество моделирования, разработана методика автоматической калибровки модели.

- Одномерная модель GLM может успешно применяться не только для небольших водоемов с замедленным водообменом, но и для долинных водохранилищ сезонного и многолетнего регулирования стока. Модель адекватно воспроизводит термический и уровенный режим Можайского водохранилища. При использовании совместно с моделями формирования стока и алгоритмами расчета сбросов воды одномерная модель водохранилища может применяться для расчетных и прогнозных задач, связанных с изучением годового термического цикла.

- Из рассмотренных сценариев будущих изменений климата по сценарию SSP1-2.6 изменения в сроках наступления ледовых явлений, термическом режиме и режиме перемешивания продолжаются только до середины века,

после чего значения количественных показателей термического режима стабилизируются на достигнутом к середине века уровне. Сценарии SSP3-7.0 и SSP5-8.5 характеризуются нарастающим темпом изменений для всех рассмотренных показателей термического режима в течение всего XXI века. При «мягком» сценарии температура воды к концу века увеличивается в среднем на 2,0–2,7 °С относительно современных условий, при «среднем» сценарии – на 4,2–5,1 °С, при «жестком» сценарии – на 4,5–5,5 °С.

– При «среднем» сценарии сокращение периода ледостава к концу XXI века относительно современных условий составляет в среднем 62–69 дней, при «жестком» – 81–87 дней. В результате озера, в настоящее время являющиеся димиктическими, могут перейти в тип холодных мономиктических озер, что будет иметь огромное значение для их экосистем в зимний период. В летний период для димиктических озер основной тенденцией является постоянное увеличение продолжительности летней стратификации в течение XXI века. Для неглубоких полимиктических озер также ожидается увеличение продолжительности периодов стратификации, но качественных изменений в режиме перемешивания не отмечается. Увеличение продолжительности летней стратификации относительно современных условий составляет 13–17 дней по «мягкому» сценарию, 36–41 день по «среднему» сценарию и 35–45 дней по «жесткому» сценарию.

– По всем сценариям будущих изменений климата ожидается увеличение как средней температуры воды за период открытой воды, так и продолжительности периодов с высокими и экстремально высокими температурами воды. К концу века продолжительность периодов с температурой воды более 25 °С при «мягком» сценарии достигает 31–38 дней, при «среднем» и «жестком» сценариях – 63–72 дня в году. Температура воды выше 30 °С к концу века при «мягком» сценарии достигается в среднем 1–2 дня в году, при «среднем» сценарии – 8–11 дней в году, при «жестком» сценарии – 12–17 дней в году. В результате могут изменяться как пригодность воды для хозяйственного использования, так и условия обитания гидробионтов.

– Для температуры придонного слоя воды значимые сильные изменения отмечаются только для полимиктического озера, где увеличиваются как среднее, так и максимальное ее значение за летний период, в то время как для трех димиктических водоемов только при «жестком» сценарии отмечается крайне небольшой тренд к усилению прогрева придонных слоев воды. За счет увеличения разности температур между поверхностным и придонным горизонтами во всех водоемах возрастает устойчивость стратификации.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, определенных в п.2.3 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова:

1. **Терешина М.А.** Сезонная и синоптическая изменчивость гидроэкологических характеристик слабопроточного долинного водохранилища / Гречушникова М.Г., Соколов Д.И., Ерина О.Н., Терешина М.А., Ломов В.А., Ефимова Л.Е. // Метеорология и гидрология. 2020. № 8. С. 92–101. 1,16 п.л. ИФ РИНЦ = 1.46, доля участия 1/6.

2. **Терешина М.А.** Современный режим биогенных веществ в Можайском водохранилище / Ерина О.Н., Терешина М.А., Ефимова Л.Е., Соколов Д.И. // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2020. № 3. С. 81–90. 1,16 п.л. SJR = 0.26, доля участия 1/4.

3. **Tereshina M.** Nutrients and zooplankton as factors controlling phytoplankton growth in the Cheboksary Reservoir / Tereshina M., Erina O., Zhikharev V., Vodeneeva E., Sokolov D., Gavrillo D., Shurganova G. // Hydrobiologia. 2023. DOI: 10.1007/s10750-023-05367-4. 2,08 п.л. SJR = 0.77, доля участия 1/3.

4. **Терешина М.А.** Оценка чувствительности одномерной модели озера к входным данным / Терешина М.А., Ерина О.Н., Соколов Д.И. // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2024. Т. 79. № 3. С. 64–77. 1,62 п.л. SJR = 0.26, доля участия 1/2.

5. **Tereshina M.** Lake physics in changing climate: Case study of Kosino lakes (Moscow, Russia) in 1984–2023 / Tereshina M., Erina O., Sokolov D., Pilipenko K., Labutin T. // Geography, Environment, Sustainability. 2025. Vol. 18. № 1. P. 35–43. 1,04 п.л. SJR = 0.35, доля участия 1/2.

Публикации в прочих рецензируемых научных изданиях и сборниках конференций:

6. **Tereshina M.** Ecological state evaluation for Lake Glubokoe in Moscow Region / Erina O., Vilimovich E., Tereshina M., Sokolov D., Korovchinsky N. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 211. P. 012035. 1,15 п.л. SJR = 0.20, доля участия 1/5.

7. **Tereshina M.** Nutrient and organic matter dynamics in Lake Glubokoe / Tereshina M., Erina O., Vilimovich E., Sokolov D., Korovchinsky N. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 321. P. 012044. 0,81 п.л. SJR = 0.20, доля участия 1/5.