

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Институт водных проблем

Саминский

На правах рукописи

Саминский Григорий Александрович

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО
РЕЖИМА ДОЛИННОГО ВОДОХРАНИЛИЩА
(на примере Иваньковского водохранилища)

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Москва, 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте водных проблем РАН

Научный руководитель: **Дебольская Елена Ивановна**
доктор технических наук

Официальные оппоненты: **Науменко Михаил Арсеньевич**
доктор географических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт озераедения РАН, заведующий лабораторией гидрологии

Фролова Наталья Леонидовна
Доктор географических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова"
географический факультет, кафедра гидрологии суши

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт географии РАН

Защита диссертации состоится « 3 » октября 2013 г. в 14:00 часов на заседании Диссертационного совета Д002.040.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте водных проблем РАН по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д.3

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института водных проблем РАН.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу: 119333, Москва, ул.Губкина, д.3. Институт водных проблем РАН, ученому секретарю диссертационного совета Д002.040.01

Автореферат разослан « 3 » сентября 2013 г.

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



Р.Г. Джамалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Проблема использования водных ресурсов на современном этапе развития человечества становится все более актуальной. Возникновение новых хозяйственных объектов и нерациональная эксплуатация старых приводит к снижению качества вод пресных водоемов, иногда до полного исчезновения существующих экосистем. Проблемы ухудшения экологического состояния водоемов, связанные с усилением антропогенной нагрузки, усугубляются глобальными климатическими изменениями, происходящими в последние десятилетия. Они выражаются в заметных температурных трендах, наблюдающихся в приземных слоях атмосферы и в водной толще, и изменении режима ветрового воздействия, что вызывает перестройку термической структуры и обменных процессов. Повышение температуры воды и образование застойных и слабопроточных зон способствует увеличению продолжительности и интенсивности цветения токсичных сине-зеленых водорослей. Другой актуальной проблемой становится изменение температурного режима водоемов-охладителей. В связи с этим необходимость исследования термических и гидродинамических процессов в водоемах приобретает все более острый характер. Особенно это актуально для Иваньковского водохранилища, как источника питьевого водоснабжения г.Москвы.

Существенный прорыв в теоретическом и практическом направлениях этих исследований оказался возможен благодаря развитию численных методов и информационных технологий. Развитие математического моделирования в области гидрологии позволяет проводить новые, ранее недоступные исследования природных и антропогенных факторов, влияющих на состояние водоемов. Существует множество моделей, описывающих природные процессы с разных позиций и с разными допущениями. Выбор модели для проведения конкретного исследования определяется условиями поставленной задачи.

При моделировании процессов во внутренних водоемах наибольшее распространение получили осредненные по вертикали модели. Между тем, многочисленные измерения, проведенные на значительном ряде водоемов, показывают, что вертикальная структура гидродинамических и термических параметров не является однородной. Поэтому расчеты, проведенные с использованием двумерных моделей, имеют существенные ограничения. Использование трехмерных моделей позволяет исследовать вертикальную гидродинамическую, термическую и турбулентную структуры, в значительной степени определяющие процессы переноса в водоемах. Специфической задачей является моделирование долинных водохранилищ, для которых характерна значительная расчлененность рельефа дна и наличие русла затопленной реки, чего не наблюдается в искусственных водоемах других морфометрических типов.

Оценка степени влияния изменений климата и антропогенной нагрузки в виде теплового загрязнения от сбросов Конаковской ГРЭС на

экологическое состояние Ивановского водохранилища, как проточного водоема-охладителя и источника водоснабжения г. Москвы, определила **цель работы**, заключающуюся в расчете характеристик термогидродинамической структуры Ивановского водохранилища путем адаптации трехмерной математической модели GETM.

Задачи исследования

В задачи исследования входит:

- Сравнительный анализ существующих эмпирических и численных моделей гидродинамического и термического режимов водохранилищ и водоемов-охладителей;
- Адаптация численной трехмерной математической модели GETM для расчетов термического и гидродинамического режимов для Ивановского водохранилища и Мошковичского залива с учетом его функции водоема-охладителя;
- Проведение натурных исследований с целью валидации модели применительно к Ивановскому водохранилищу;
- Сравнение результатов численных расчетов с данными наблюдений;
- Расчет возможных изменений в термическом и гидродинамическом режимах Ивановского водохранилища при увеличении мощности Конаковской ГРЭС и экстремальных погодных условиях;
- Исследование влияния ветрового воздействия на термогидродинамическую структуру Ивановского водохранилища и на охлаждающую способность Мошковичского залива;
- Исследование влияния вертикальной турбулентной структуры на процессы массо- и теплообмена на основе данных численных экспериментов для выявления условий возникновения и факторов развития структур, неблагоприятных с экологической точки зрения и влияющих на качество вод.

Защищаемые положения

- Трехмерная численная модель термогидродинамической структуры Ивановского водохранилища, созданную на базе усовершенствованной модели GETM
- Выявленные особенности термического режима Ивановского водохранилища при экстремальных метеорологических условиях и изменяющемся тепловом сбросе с Конаковской ГРЭС.
- Роль ветрового форсинга в изменении термогидродинамической структуры Ивановского водохранилища и Мошковичского залива, а также охлаждающей способности последнего.
- Комплекс безразмерных параметров турбулентности, позволяющий выделить экологически неблагоприятные зоны Ивановского водохранилища, характеризующиеся слабым массообменом.

Научная новизна

Впервые для Ивановского водохранилища представлена и проанализирована трехмерная численная модель термогидродинамической

структуры. Для валидации модели были получены новые данные натурных исследований, проведенных автором. Впервые выполнены прогностические численные расчеты термического режима Иваньковского водохранилища и Мошковичского залива, как водоема-охладителя, в условиях экстремальных гидрометеорологических ситуаций и повышенного сброса с ГРЭС. Получена оценка ветрового воздействия на термогидродинамическую структуру Иваньковского водохранилища с помощью трехмерной модели, рассмотрено влияние направления ветра на охлаждающую способность Мошковичского залива. Предложен комплекс безразмерных параметров для характеристики процессов турбулентного обмена в водохранилище и выявления экологически неблагоприятных зон.

Практическая значимость работы

Результаты работы позволяют провести оценку возможности возникновения теплового загрязнения вод и нарушения определенных условий эксплуатации водоема-охладителя при глобальном изменении климата и увеличении мощности Конаковской ГРЭС. По данным измерений разработана цифровая батиметрическая карта Иваньковского водохранилища, позволяющая использовать различные модели для расчета и прогнозирования изменений термогидродинамического режима Иваньковского водохранилища. Разработана методика определения условий возникновения гидродинамических структур, неблагоприятных для экологической системы водохранилища.

Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов исследования подтверждается результатами натурных исследований с использованием существующих апробированных методов измерений, использованием известных физических предпосылок, положенных в основу модели, положительными результатами сравнения результатов численных расчетов с данными натурных измерений.

Апробация работы

Результаты, полученные в рамках диссертационной работы, докладывались и обсуждались на заседаниях семинаров и Ученого Совета ИВП РАН, на конференции «EGU General Assembly 2012», IV Всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России», IV Международной научно-практической конференции «Современные проблемы водохранилищ и их водосборов».

Публикации

Результаты, полученные в диссертации, опубликованы в печатных работах, в том числе в двух рецензируемых журналах.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 111 наименований. Полный объем диссертации составляет 187 страниц, включая 109 рисунков и 13 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описывается актуальность работы, цели и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, основные аспекты ее содержания. Климатические изменения и усиление антропогенных нагрузок, в том числе теплового загрязнения приводят к изменению экосистемы водохранилища. Увеличение сроков и интенсивности цветения сине-зеленых водорослей связано прежде всего с изменением температурного режима и процессов массообмена. Повышение среднегодовых температур воды приводит к ухудшению условий эксплуатации водоемов-охладителей.

В главе 1 на основе обзора литературных источников приводится классификация водохранилищ, отмечаются основные особенности долинных водохранилищ; описываются термические и гидродинамические процессы, происходящие в открытых водоемах в безледный период. Приведены основные положения расчета теплового баланса водоемов и обзор основных параметров турбулентности. Отмечается, что изучение гидродинамики и термики водохранилищ началось с момента их проектирования и отражает общие закономерности, присущие внутренним водоемам. В связи с интенсивным развитием энергетики, использующей системы водяного охлаждения, в последнее время получили широкое развитие исследования гидродинамики и термики водоемов-охладителей. В главе рассматриваются характерные черты их термического режима и особенности гидродинамического режима, анализируются методы численного моделирования термического режима. Отмечается, что современное развитие математического моделирования позволяет существенно повысить эффективность исследования термического и динамического режима водохранилищ и водоемов-охладителей. Приводится обзор основных подходов в математическом моделировании термогидродинамических процессов внутренних водоемов и некоторых моделей. Обосновывается выбор трехмерной модели GETM для численного моделирования термогидродинамической структуры Иваньковского водохранилища, приводится система базовых уравнений и граничных условий. Преимущества модели GETM по сравнению с другими моделями заключаются в ее доступности, открытости, т.е. возможности изменения кода применительно к задачам, поставленным в работе. Модель GETM опробована для многих водных объектов, в том числе мелководных, позволяет использовать для замыкания различные модели турбулентности и разные возможности расчета биогеохимических характеристик. В настоящее время GETM используется в качестве основной модели для прогноза уровней воды, скоростей, солености и температуры в Королевской Администрации навигации и гидрографии в Дании и в Объединенном Исследовательском Центре Европейской комиссии в качестве основополагающего компонента для создания согласованных многолетних расчетов для всех европейских региональных морей.

В главе 1 также приводится один из сценариев изменения климата и рассматривается влияние глобального потепления на термический режим водохранилищ и их эвтрофикацию. На основании проведенного анализа делается вывод о необходимости прогноза термического режима водохранилища, как основного фактора формирования экологического состояния, в условиях глобального потепления при наличии тепловой антропогенной нагрузки. Приводится также обзор литературных данных о влиянии режима течений и характеристик турбулентности на водные организмы и экологическое состояние водоемов. Анализируются работы, посвященные современному состоянию исследований Иваньковского водохранилища - источника питьевого водоснабжения г. Москвы.

В главе 2 рассматриваются физико-географическое положение, климатические особенности района исследований, геологические, геоморфологические особенности, гидрологические характеристики Иваньковского водохранилища как водоема комплексного назначения и как водоема-охладителя Конаковской ГРЭС (рис. 1). Приводится историческая справка и технические характеристики электростанции. Описывается методика проведения натурных измерений для валидации модели.

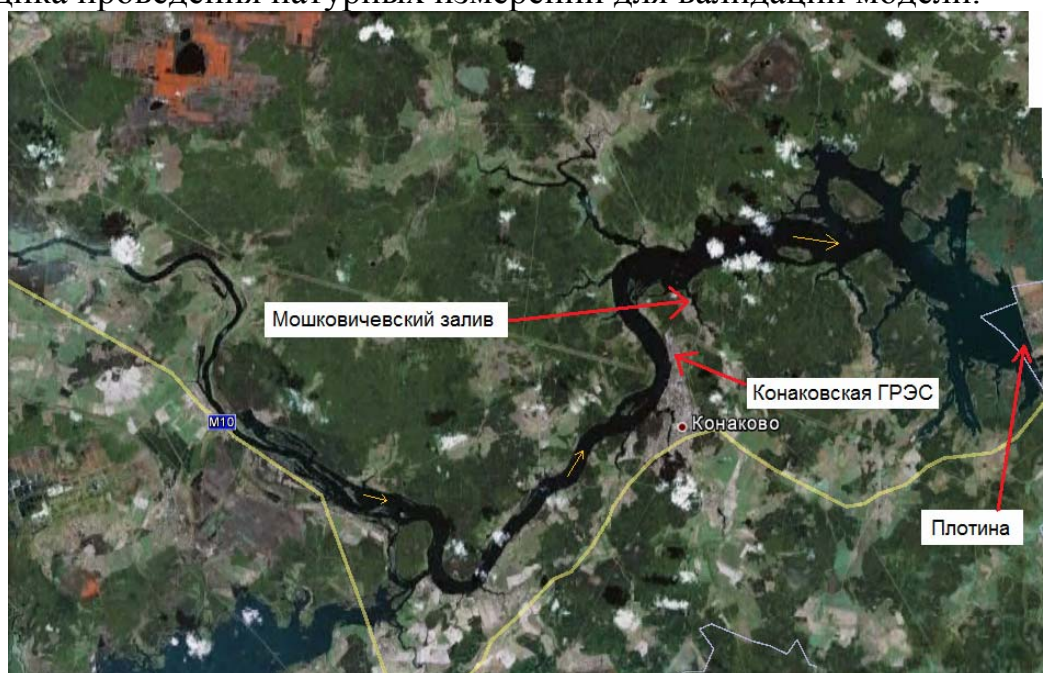


Рис. 1. Иваньковское водохранилище, космический снимок

Представлены характеристики измерительной аппаратуры (навигационной, гидрометрической, метеорологической) и методика проведения исследований.

Приводятся примеры из созданных баз данных с координатами береговой линии Иваньковского водохранилища и глубинами водоема в точках, положение которых привязано к географическим координатам с помощью GPS.

Описывается построенная по результатам измерений подробная цифровая батиметрическая модель Иваньковского водохранилища, которая может быть использована для расчетов; приводится растровое изображение

созданной батиметрической модели. Приведено описание литературных данных, также использованных при моделировании водохранилища.

Данные о структуре водного баланса, полученные из различных источников, позволяют в достаточной степени учесть влияние положительных и отрицательных источников на структуру течений в Ивановском водохранилище.

Валидация модели Ивановского водохранилища, была выполнена как по данным измерений температуры поверхности водоема, проведенных автором, так и по литературным данным.

Валидация с использованием собственных измерений автора проводилась по данным измерений, проведенных в 2010 -2011 г.г. в рамках экспедиционных работ ИВП РАН. Точность аппаратуры, использованной для измерений температуры воды, составляла 0,1°С. Изменение температуры воды в течение периода измерений может достигать 0,6°С. Этот факт в сочетании с точностью измерительного прибора показывает, что удовлетворительная точность моделирования составляет 0,7°С.

Сравнение данных измерений с результатами моделирования оказалось удовлетворительным: разница между рассчитанной и измеренной температурой воды на большей части акватории оказалась менее 0,5 °С.

Статистическая оценка точности моделирования проводилась с использованием средней квадратической ошибки и относительной средней квадратической ошибки.

При определении систематических ошибок и оценке величины случайных ошибок использовались характеристики k^+ и k^- :

$$k^+ = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i^+}{\Delta t_c}, \quad k^- = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta t_i^-}{\Delta t_c},$$

где Δt_i^+ и Δt_i^- - положительное и отрицательное отклонение расчетной температуры водной поверхности от измеренной, Δt_c – амплитуда температуры водной поверхности, n – количество положительных отклонений, m – количество отрицательных отклонений.

Анализ величин k^- и k^+ и их соотношение может показать наличие систематических и случайных ошибок.

Среднеквадратическое отклонение моделирования при использовании всех авторских данных наблюдений и вычислений составляет $m = 0,65^\circ\text{C}$. Относительная средняя квадратичная ошибка составляет $\delta = 0,043$ или 4,3%. Такой результат показывает удовлетворительную точность моделирования в целом.

Анализ посуточных величин k^- и k^+ показывает, что несмотря на то, что хотя абсолютные величины k^- и k^+ не велики (<12%) отношение $(k^+ / |k^-| - 1) \cdot 100\%$ достигает значительных величин в мелководных застойных заливах с глубиной менее 2 м. В моделировании это влияние не учитывалось, что вызвало появление систематической ошибки.

Без учета в вычислениях выявленной нами систематической ошибки среднеквадратическая ошибка моделирования составляет $m = 0,53^\circ\text{C}$, а

относительная средняя квадратичная ошибка $\delta = 0,036$ или 3,6%. Такие величины данных статистических характеристик свидетельствуют о хорошей точности результатов моделирования, без учета систематических ошибок. Анализ посуточных величин k^- и k^+ показывает отсутствие систематических ошибок (табл. 1.)

Таблица 1. Посуточные значения величин k^- и k^+ без учета влияния мелководных зон.

дата	$ k^- *100\%$	$k^+*100\%$
02.09.	2,6	2,9
07.09	2,8	2,6
08.09	4,5	4,4
14.09	6,3	6,5
16.09	6,8	6
за все дни измерений	5,1	5,6

Для валидации модели были также использованы данные измерений температуры и скорости на разных глубинах, полученные в 1981 году гидрологическим отрядом Института водных проблем АН СССР. Среднеквадратическое отклонение измеренных и расчетных значений температуры воды составляет 0,3 °С, что свидетельствует о хороших результатах моделирования. Среднеквадратическая ошибка между измеренными и рассчитанными для разных вертикалей скоростями составляет 1,8 см/с, что меньше точности измерений. Анализ рассчитанных и измеренных эпюр для всех участков Иваньковского водохранилища также показывает хорошую точность описания вертикального распределения температуры воды и скорости течения с помощью модели GETM.

В главе приводятся результаты моделирования Иваньковского водохранилища в условиях реальной погоды лета 2011 года и среднемноголетнего притока воды в водохранилище.

Результаты моделирования показали, что распределение поверхностных скоростей течения в Иваньковском водохранилище неоднородно (рис. 2). Наибольшие скорости наблюдаются в верхней (западной) части водохранилища. Здесь они достигают 10-13 см/с. В центральной глубоководной части Иваньковского водохранилища наблюдаются скорости 3-6 см/с. В центральной мелководной части Иваньковского водохранилища скорости течения изменяются от 0,1 см/с до 4 см/с. В приплотинной части водохранилища средние скорости течения составляют 2,5 см/с. Во всех областях течения направлены от верхней части водохранилища к плотине, противоположно направленным течением не наблюдается (рис 2).

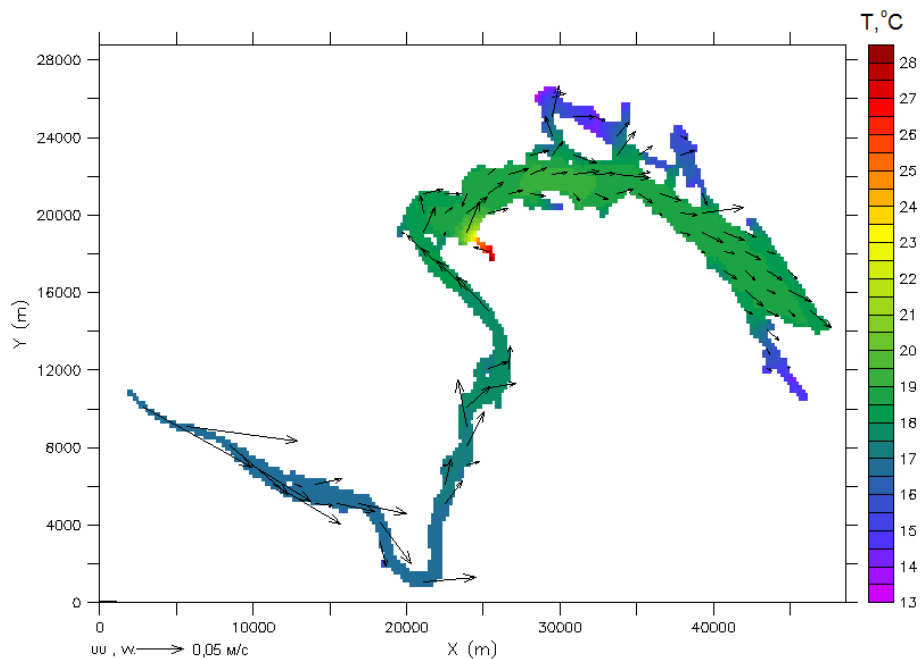


Рис. 2. Распределение температуры водной поверхности и скорости течения в Иваньковском водохранилище 26 августа 2011 г.

Приводятся результаты моделирования Иваньковского водохранилища при экстремальных метеорологических условиях (температура воздуха $T=34\text{ }^\circ\text{C}$, температура точки росы $T_d=13\text{ }^\circ\text{C}$, скорость ветра $U=0\text{ м/с}$, общая облачность $N_c=0$ баллов, давление $P=100002\text{ Па}$) (рис. 3). Экстремальные метеорологические условия были определены ранжированием сроков метеонаблюдений летом 2010 и летом 2011 года по температуре воздуха. Для моделирования были выбраны метеорологические условия, соответствующие 3% обеспеченности.

15 августа

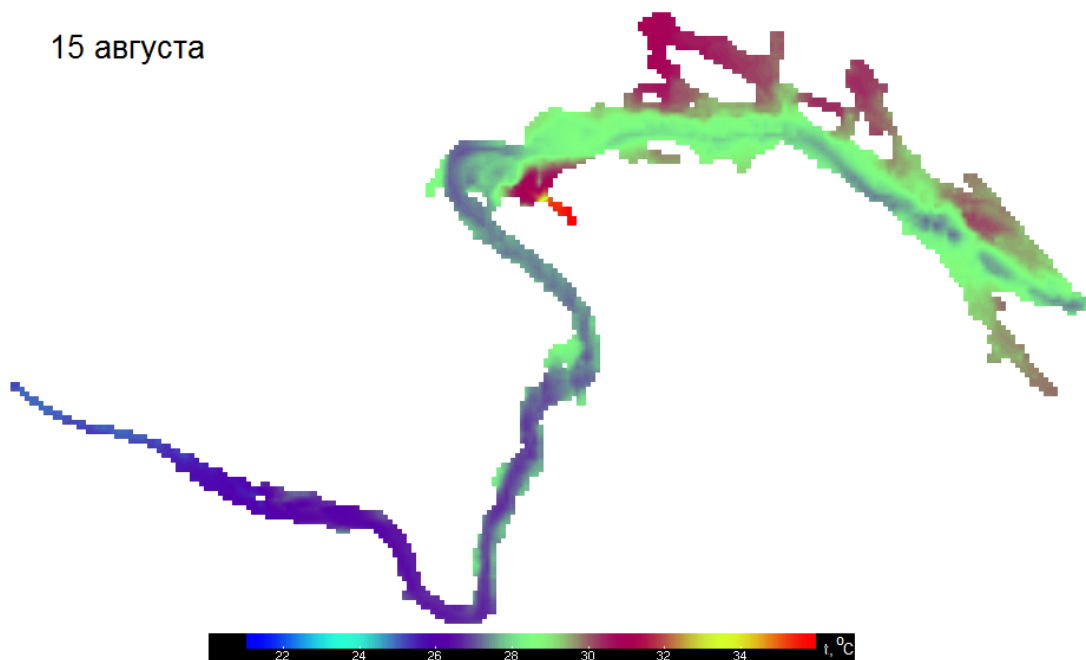


Рис 3. Моделирование Иваньковского водохранилища в условиях экстремально жаркой погоды с притоком солнечной радиации, характерным для 15 августа.

Зона влияния подогретых вод Мошковичевского залива на термические характеристики Иваньковского водохранилища увеличилась до 2 км от устья залива. Температура водной поверхности большей части водохранилища достигает 28°C, в некоторых мелководных заливах Иваньковского плеса до 31 °С. Вместе с тем, общая тенденция к увеличению температуры воды от верховьев водохранилища к приплотинной его части осталась неизменной.

В третьей главе представлены результаты натурных исследований в Мошковичевском заливе и их сопоставление с данными численного моделирования. Проведен анализ термической и динамической структуры залива, численная оценка влияния теплового сброса ГРЭС на термический и динамический режимы залива. Оценена возможность нарушения режима эксплуатации Иваньковского водохранилища как водоема-охладителя, описаны результаты эксперимента, определяющего влияние направления ветра на термический и гидродинамический режимы Мошковичевского залива.

Представлены модельные тесты, позволяющие адаптировать батиметрические данные для нужд модели и показывающие устойчивость модели при отсутствии источников и при наличии теплового сброса.

Проведено сравнение данных наблюдений и результатов численного моделирования, которое продемонстрировало их хорошее соответствие и существование неоднородной вертикальной термической структуры. В подтверждение выводов приводятся различные статистические данные, схемы и графики. Показано, что модель адаптирована для водоемов-охладителей, а проведенные расчеты соответствуют фактическим данным.

Приведена схема зонирования Мошковичевского залива. Моделирование залива позволяет выделить три крупных проточных и две маленьких застойных зоны, различающихся по распределению температуры воды по глубине, термическому и гидродинамическому режимам. Описывается термический и динамический режимы выделенных зон. Отмечается различное влияние теплового сброса на режим выделенных зон.

Приводятся результаты моделирования Мошковичевского залива при отсутствии теплового сброса, при экстремально жарких погодных условиях, приводится серия модельных экспериментов, позволяющих дать численную оценку влиянию направления ветра на термический и гидродинамический режимы Мошковичевского залива.

Моделирование термогидродинамического режима Мошковичевского залива при отсутствии теплового сброса позволяет получить представление о влиянии теплового сброса на термический и гидродинамический режим залива (рис 4).

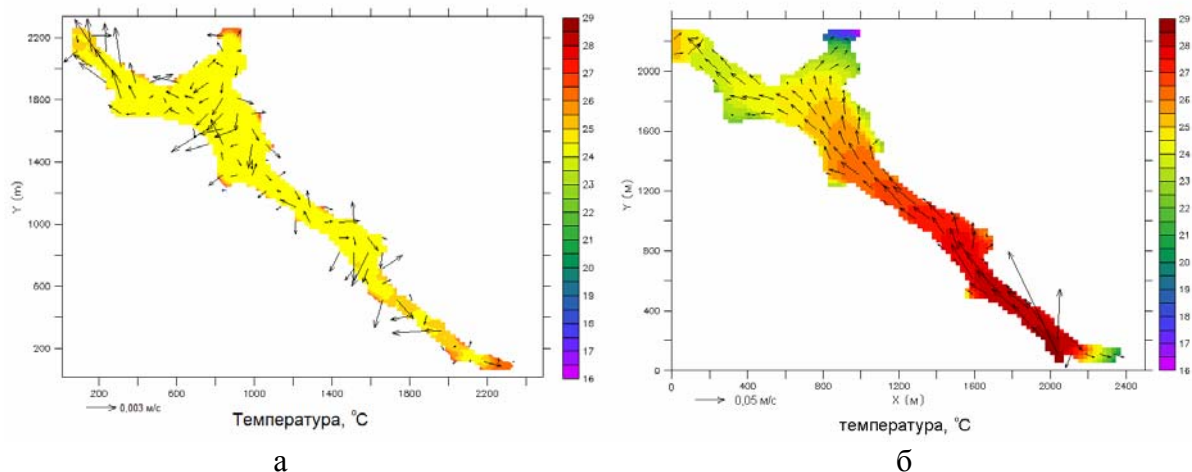


Рис. 4. Расчетные распределения температуры водной поверхности летом 2011 года в 45-й день расчета (15 июля) при отсутствии теплового влияния Конаковской ГРЭС (а) и при наличии теплового влияния ГРЭС 26 августа(б).

Сравнение данных моделирования за 2011 год при наличии и отсутствии теплового сброса позволило сделать вывод об определяющем влиянии подогретых вод на гидродинамический и термический режим Мошковичевского залива. Различия в особенностях характерных вертикалей представлены в табл.2

Таблица 2. Сравнение показателей вертикалей, характерных для выделенных трех крупных зон залива при метеоусловиях лета 2011 года при наличии и при отсутствии теплового сброса, $\Delta t_{\text{верт}}$ - амплитуда изменения температуры воды по вертикали.

Зона	$\Delta t_{\text{верт}}, ^\circ\text{C}$	
	При наличии теплового сброса	При отсутствии теплового сброса
Южная	0,02	0,19
Центральная	1,06	0,32
Приустьевая	1,7	2,68

Отмечается потенциальное увеличение расхода поступающей нагретой воды, в связи с возможным увеличением мощности Конаковской ГРЭС вследствие увеличения потребности московского региона в электроэнергии. Влияние прогнозируемого в докладах ВМО изменения климата также может неблагоприятно сказаться на режиме Иваньковского водохранилища как водоема охладителя.

В связи с этим приводятся результаты моделирования Мошковичевского залива при экстремально жарких погодных условиях и увеличенном тепловом стоке Конаковской ГРЭС (рис 5).

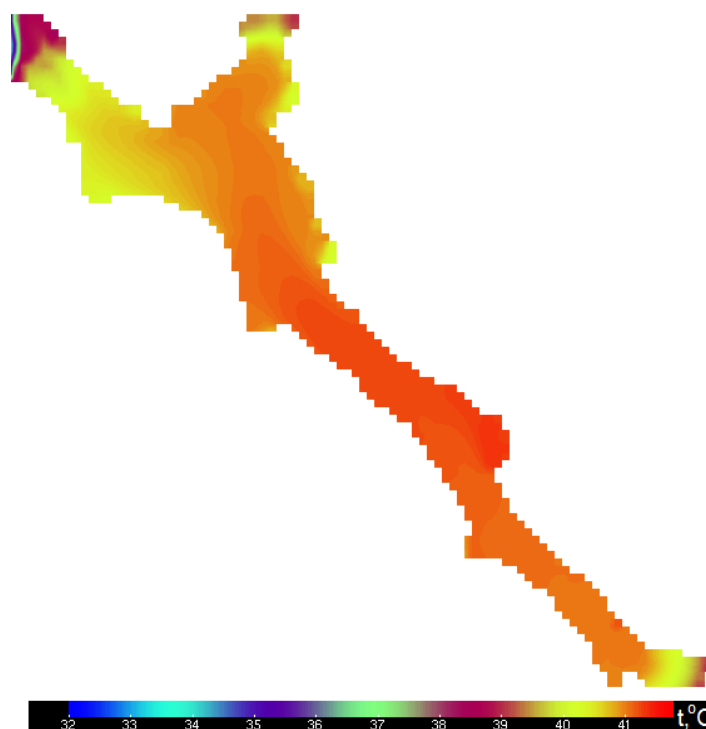


Рис. 5. Распределение температуры водной поверхности в Мошковичевском заливе при экстремальных метеоусловиях в 60-й день (30 июля) моделирования.

Экстремально жаркие метеорологические условия были определены так же, как и в аналогичном случае моделирования Иваньковского водохранилища.

Температура воды в заливе при этом будет изменяться в пределах 36 – 41,5 °С, а вертикальная неравномерность температуры воды усилится в сравнении с тем, что наблюдается при метеоусловиях лета 2011 года. Отмечается, что в случае наступления длительного периода экстремальных метеоусловий, будет нарушен режим эксплуатации Мошковичевского залива как водоема-охладителя.

Определение влияния направления ветра на термический и гидродинамический режим Мошковичевского залива при существующих объемах сброса подогретых вод проводилось путем нивелирования всех прочих факторов, влияющих на температурное поле залива. Для этого во время всех модельных экспериментов задавалась одна и так же температура сбросных воды, один и тот же объем сброса, и одинаковая скорость ветра.

Выполнено исследование динамики термического режима Мошковичевского залива при северном, южном, западном и восточном направлениях ветра. Для каждого направления ветра проводился расчет в течение 9 дней при постоянных погодных условиях в течение всего периода моделирования. Таким образом, для одних и тех же метеорологических условий изучалось влияние различных направлений ветра.

В модельных экспериментах использовались метеонаблюдения с температурой воздуха различной обеспеченности (табл 3) по выборке сроков метеонаблюдений за лето 2010, 2011 на м/с Тверь.

Таблица 3. Метеонаблюдения на станции Тверь различной обеспеченности по температуре воздуха.

T, °C	T _d , °C	N, баллы	P, Па	P _{ti} , %
38,6	8,1	1	102106,7	0,068
26,6	18,1	0	101640	24,9
20,2	16,9	0,1	101973,3	49,9
15,8	4,5	0,9	101960	74,9
4,6	4,1	0,9	100108	99,9

Данный модельный эксперимент показал, что средняя температура Мошковичевского залива практически не зависит от направления ветра (табл 4). Различия наблюдаются в трехмерной термической и гидродинамической структуре залива. Температурное поле водной поверхности в центральной и южной зонах Мошковичевского залива почти не изменяется при любых направлениях ветра. Основные различия наблюдаются в приустьевой зоне.

Таблица 4. Средняя температура Мошковичевского залива при различных метеорологических условиях и разных направлениях ветра. УНС – условный номер срока наблюдений данной обеспеченности.

УНС	1	2	3	4	5
P _i , %	0,068	24,95	49,97	74,95	99,93
T(N)	27,06	27,3	26,04	23,18	21,47
T(E)	27,07	27,31	26,14	23,22	21,47
T(S)	27,13	27,34	26,19	23,43	21,73
T(W)	27,07	27,29	26,03	23,24	21,57
ΔT _{max}	0,06	0,05	0,16	0,25	0,26

Температура водной поверхности в заливе относительно более высокая при южном и восточном ветрах. При западном ветре температура поверхности Мошковичевского залива наименьшая. Это связано с направлением залива с юго-востока на северо-запад – южные и восточные ветры способствуют распространению подогретых вод Конаковской ГРЭС по поверхности залива, а западные и северные препятствуют этому, что приводит к снижению температуры воды в приустьевой зоне.

При восточном ветре в приустьевой зоне наблюдается нагон к юго-западному берегу залива, а при южном – нагон к северо-восточному берегу залива, что приводит соответствующему повышению температуры воды у юго-западного берега при восточном ветре и у северо-восточного берега при южном ветре.

При северном и западном ветрах в приустьевой зоне нередко можно наблюдать более ярко выраженную тепловую струю, чем при других направлениях ветра.

В главе 4 диссертации рассматриваются вертикальная турбулентная структура Иваньковского водохранилища и Мошковичевского залива.

Важность изучения турбулентной структуры водоемов обусловлена прежде всего тем, что турбулентный обмен является основным фактором всех видов переноса. Кроме того, гидрофизические процессы в значительной мере формируют среду обитания гидробионтов, определяют перенос и седиментацию веществ, интенсивность процессов загрязнения и самоочищения водоемов. К гидрофизическим процессам в водоёмах, влияющим на функционирование экологических систем, относятся, прежде всего, перемешивание и теплообмен.

В главе продемонстрированы возможности и необходимость использования трехмерной модели для оценки турбулентной структуры водохранилища.

Проведено исследование временной изменчивости таких турбулентных характеристик, как коэффициента турбулентной вязкости ν_T , кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации энергии ε , и их связи с ветровым воздействием. Показано, что именно оно является основным источником турбулентности в водохранилище. Для более детального исследования воздействия ветра было выбрано два разреза, поперечные сечения которых расположены взаимно перпендикулярно. Расположение выбранных сечений и изменения глубин в них представлены на рис. 6.

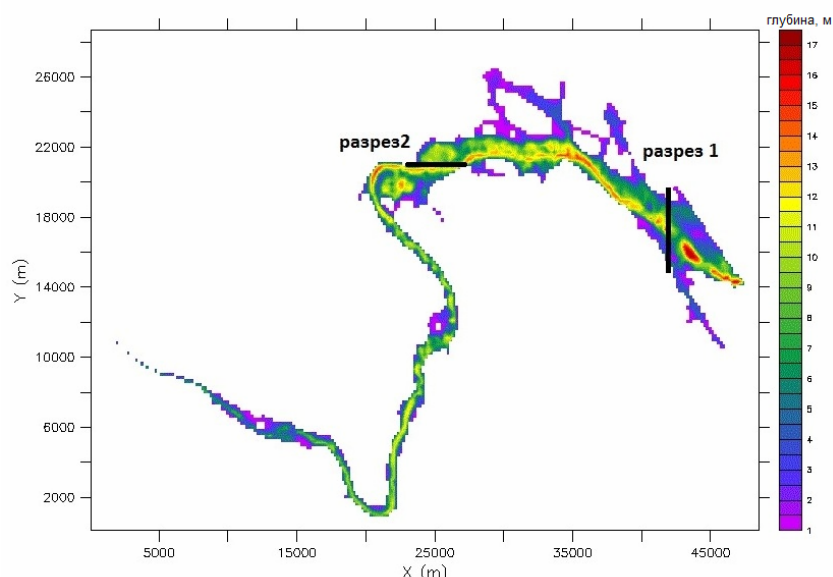


Рис. 6 Расположение выбранных для анализа профилей

Влияние ветра должно по-разному сказываться на характеристики потока в показанных на рис.6 разрезах. Анализ изменения уровня свободной поверхности демонстрирует, что, как и следовало ожидать, на разрезе, расположенном перпендикулярно основному направлению ветра, он существенно влияет на изменение уровня в продольном направлении и не

влияет на поперечный уклон свободной поверхности. На разрезе 2, расположенном параллельно направлению продольной компоненты скорости ветра, усиление ветра приводит к изменению уровня в поперечном направлении. На основании проведенного анализа был сделан вывод, что модель адекватно отражает воздействие ветров различной направленности на расходные характеристики потока.

Так как основным проявлением турбулентного обмена является изменчивость вертикальной структуры потока, было рассмотрено, как сказывается на нее воздействие ветра. Показателями такого изменения может служить поведение вертикальной компоненты скорости течения w и температура, выступающая в нашем случае как трассер. На рис. 7 приведено изменение во времени вертикальной компоненты скорости течения, осредненной по ширине разреза, для двух взаимно перпендикулярно расположенных разрезов, в придонном и приповерхностном слоях.

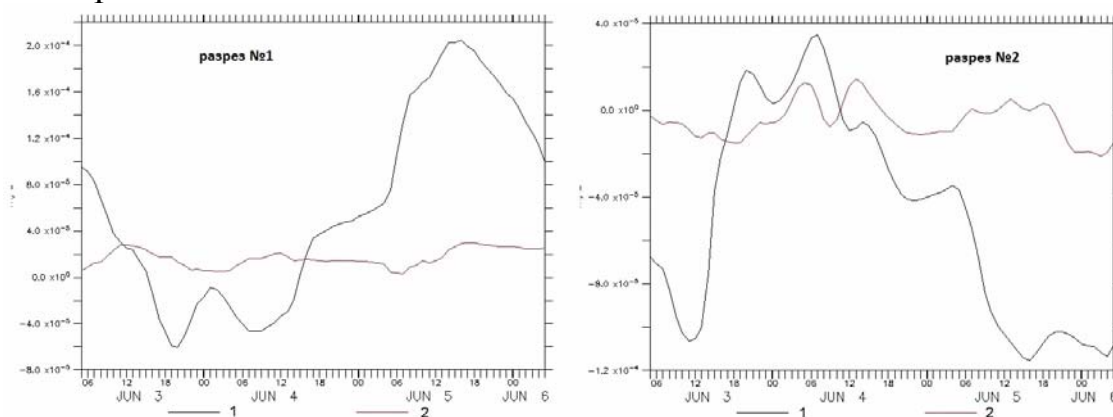


Рис.7 Изменение во времени вертикальной компоненты скорости течения, осредненной по ширине разреза, для разреза 1 и разреза 2, в придонном (1) и приповерхностном (2) слоях.

Проанализировав графики, приведенные на рис.7, временной ход компонент скорости ветра и расположение створов, можно заключить, что противоположное направление вертикальной скорости на двух перпендикулярно расположенных на большом расстоянии друг от друга створов в придонном слое и их дальнейшее изменение направления в зависимости от изменения направления ветра с противоположного основному течению на попутное, свидетельствует о существовании вихревых структур, основным источником энергии для которых является ветровое воздействие.

Значительные изменения в вертикальной структуре потока под воздействием ветра наиболее ярко демонстрируют распределения температуры от момента начала ветрового воздействия через прохождение его пика к окончанию, приведенные на рис.8.

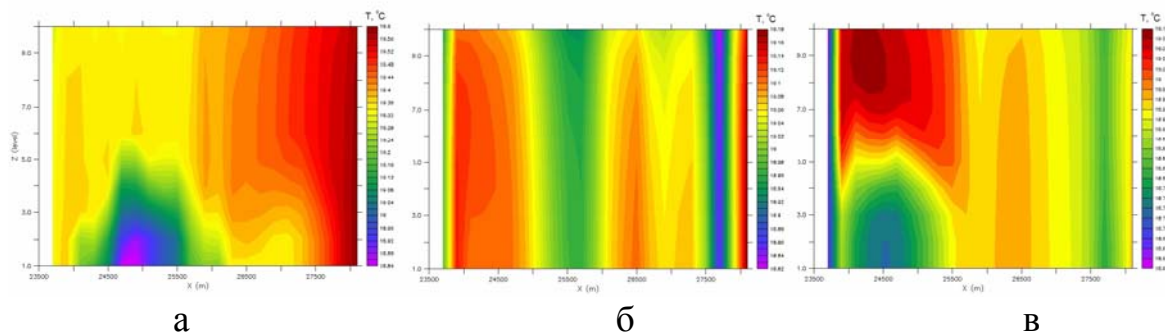


Рис.8 Распределение температуры в разрезе 2 в зависимости от ветрового воздействия; а – начало действия ветра, б – пик действия ветра, в – завершение действия ветра.

Из рисунка 8 видно, как более прогретые массы от правого берега смещаются к левому (в направлении ветра), и к моменту уменьшения скорости ветра под левым берегом образуется неравномерно распределенная по глубине тепловая структура. Проведенный анализ показывает, что ветровое воздействие играет определяющую роль на формирование вертикальной термогидродинамической структуры водоема.

Проведен анализ турбулентных характеристик на рассматриваемом разрезе 2. На рис.9 приведены временные изменения коэффициента турбулентного обмена, осредненного по ширине разреза, для придонного и приповерхностного горизонтов. Как видно из рисунка, наибольшее увеличение обмена наблюдается у дна. В то же время кинетическая энергия турбулентности достигает максимума в период развития ветрового воздействия (рис.9), и у поверхности он гораздо больше, чем у дна, что свидетельствует о том, что ветер играет решающую роль в развитии турбулентности.

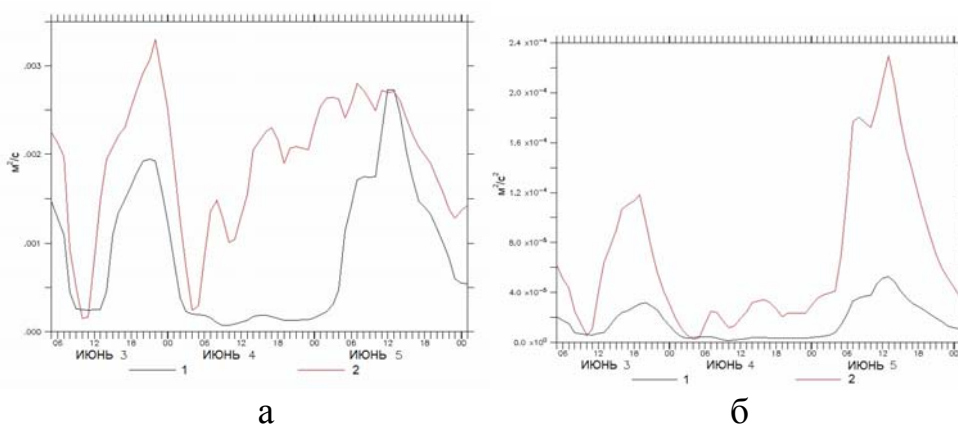


Рис.9 Изменение осредненной по разрезу 2 характеристики во времени для придонного (1) и поверхностного (2) горизонтов: а – коэффициент турбулентного обмена, б – кинетическая энергия турбулентности.

Все вышеизложенное в главе демонстрирует возможности модели для исследования вертикальной и турбулентной структур потока, в значительной степени определяющих экологическое состояние водоемов и

показывает, что применение модели к мелководному водоему адекватно отражает процессы вертикального обмена.

Основными задачами анализа турбулентной структуры Ивановского водохранилища на основе использования трехмерной модели GETM было:

1. Выявление условий возникновения и факторов развития структур, неблагоприятных с экологической точки зрения.
2. Получение оценочных критериев таких структур.
3. Разработатка методики их определения.

Введен оценочный критерий для определения условий возникновения структур, неблагоприятных с экологической точки зрения.

Выражение, характеризующее соотношение осредненного движения к турбулентному, может быть записано в виде $R_{tur} = uh/v_T$, аналогичном потоковому числу Рейнольдса. Его отличие заключается в том, что в знаменателе стоит не молекулярная, а турбулентная вязкость v_T . Заметим также, что в отличие от потокового числа Рейнольдса значения скорости и турбулентной вязкости не обязательно должны быть осреднены по всей глубине потока, т. е. параметр R_{tur} зависит не только от горизонтальных, но и от вертикальной координаты. Показано, что существуют значительные области, для которых величина R_{tur} меньше единицы, причем большинство из них расположено в мелководных прибрежных зонах. Рассмотрено изменение во времени параметра R_{tur} , осредненного по всему объему водохранилища и сравнение его с распределением по отдельным частям, например по выделенным разрезам (рис 10).

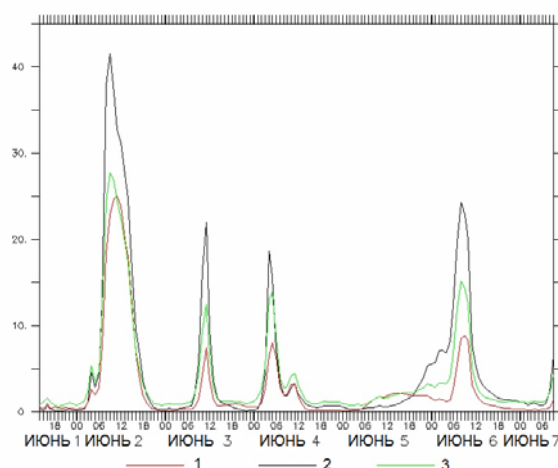


Рис.10 Величина R_{tur} по разрезу 1 (1), разрезу 2 (2) Ивановского водохранилища и по всему объему Ивановского водохранилища (3)

Из рисунка 10 видно, что как для всего водохранилища, так и для отдельных разрезов, временные изменения параметра R_{tur} схожи и имеют явную связь с интенсивностью ветрового воздействия, хотя наступление пиков на кривых $R_{tur}(t)$ отстает от максимумов модуля скорости ветра. Было сделано предположение, что критическим числом для параметра R_{tur} тоже может быть единица. Физическую суть этого критического числа

можно объяснить используя гипотезу $\nu_T = \sqrt{k}L$, связывающую коэффициент турбулентной вязкости ν_T , кинетическую энергию турбулентности $k = \frac{1}{2} \rho u'_k u'_k$ и интегральный масштаб турбулентности L .

Тогда можно записать $Rtur \approx \frac{U H}{u' L}$, причем всегда $\frac{H}{L} > 1$ и $\frac{U}{u'} > 1$.

Следовательно для вихрей интегрального масштаба, для которых выполняется соотношение $\nu_T = \sqrt{k}L$, $Rtur$ должно быть больше единицы. Но в модели коэффициент турбулентной вязкости рассчитывается без использования этого соотношения, и следовательно можно предположить, что в областях, где $Rtur < 1$, нет вихрей интегрального масштаба, а следовательно, нет передачи энергии по каскаду, и присутствуют только мелкомасштабные диссипативные вихри.

Число $Rtur$ в отличие от числа Рейнольдса (т.к. молекулярная вязкость для водоема практически неизменна) имеет кроме скорости и глубины еще один изменяемый параметр - коэффициент турбулентной вязкости. Для того, чтобы охарактеризовать состояние потока, необходимо привлечь еще одну независимую связь между параметрами, характеризующими турбулентность, а именно сопоставить размеры вихрей разных масштабов. Если размеры колмогоровских вихрей L_{Kol} и вихрей интегральных масштабов L_{int} будут близки в тех же точках и в те же моменты времени, где и когда выполняется условие $Rtur < 1$, то это будет подтверждением сделанной гипотезы о существовании в этой области только диссипативных мелкомасштабных вихрей.

На рис. 11 представлены распределения L_{int} и L_{Kol} для второго разреза в момент прекращения действия ветра. Из рисунка видно, что под правым берегом на глубине около 0.3H образовалась целая область, в которой размеры L_{Kol} достигают 0.9 см, а размеры основных энергонесущих вихрей стали меньше 2 см, т.е. они стали близки.

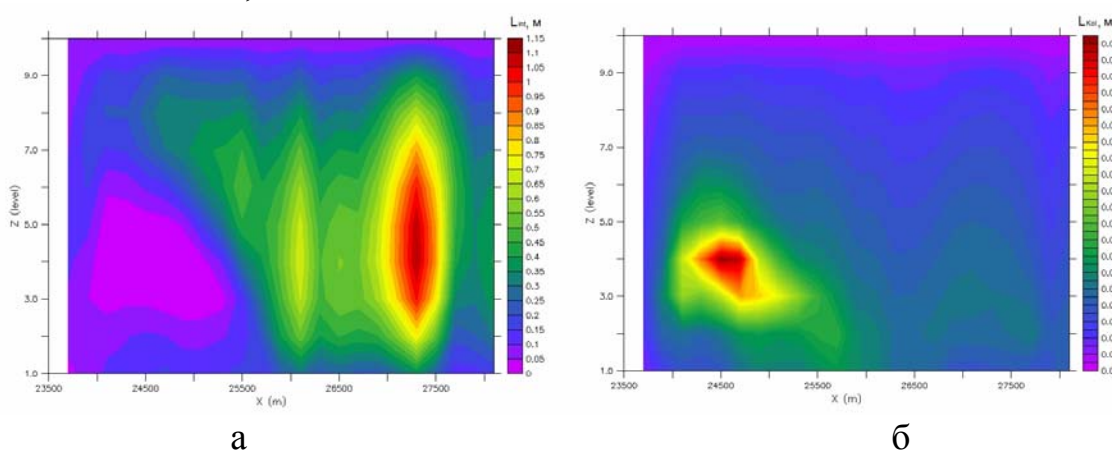


Рис. 11 Распределение L_{int} (а) и L_{Kol} (б) для разреза 2 в момент окончания действия ветра.

На рис. 12 приведены изменения во времени L_{int} и L_{Kol} в точке с условными координатами $x=30100$ м, $y=22100$ м, осредненные по глубине

от горизонта 0.2Н до 0.5Н. Видно, что в определенные моменты эти шкалы пересекаются, что означает, что появились области с преобладанием мелкомасштабных вихрей.

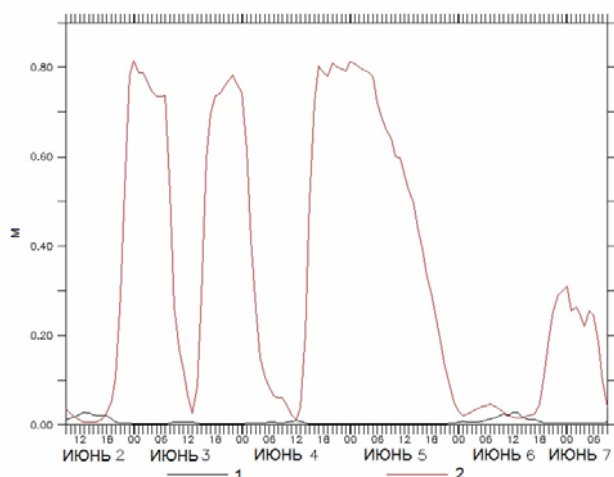


Рис. 12 Изменение во времени L_{Kol} (1) и L_{int} (2) в точке с условными координатами $x=30100$ м, $y=22100$ м, осредненные по глубине от горизонта 0,2Н до 0,5Н.

Анализируемая точка расположена на повороте русла, а при обтекании близ расположенных островов образуется система вихрей. Интересующая нас точка попала на границу двух противоположно направленных вихрей. При максимальном попутном и встречном направлениях по отношению к общему направлению течения ветрах граница между системой вихрей проходит через эту точку на всех горизонтах. Рассмотрение поля скоростей течения до смены направления ветра и после нее в придонном горизонте показывает, что направление течения сменяется на противоположное, а положение границы между противоположно направленными потоками остается неизменным, и на этой границе в определенные периоды времени выполняется условие отсутствия анизотропной турбулентности. При этом глубина водохранилища на этой границе достигает 10-12 м. На таких границах раздела обычно происходит накопление примесей различного происхождения и крупности (в том числе и бытового мусора), и их можно считать потенциально опасными с экологической точки зрения. Таким образом, удалось показать, что области с мелкомасштабной и изотропной турбулентностью могут возникать и в глубоководных зонах водохранилища.

Значительные площади мелководных областей характеризуются значениями числа $R_{tur} < 1$. Анализ соотношений L_{int} и L_{Kol} для этих областей показывает, что их значения становятся близкими, а иногда возникает ситуация, характеризующаяся выполнением неравенства $L_{int} < L_{Kol}$, как правило, при отсутствии ветрового воздействия, когда скорости потока и турбулентные параметры стремятся к нулю, а коэффициент турбулентного обмена близок к молекулярному. Таким образом, в областях потока, характеризующихся значением числа $R_{tur} < 1$ при условии отсутствия ветрового воздействия существуют только мелкомасштабные

диссипативные вихри, т. е. турбулентность становится изотропной, поскольку отсутствует передача энергии турбулентности по каскаду.

Проведенный анализ турбулентной структуры Мошковического залива представляет особый интерес, т.к. залив является более мелководным по сравнению со всем водохранилищем и обладает специфическим тепловым режимом, обусловленным тепловым сбросом с ГРЭС. Для анализа были выбраны разрез и период времени, связанный с ветровым воздействием, по той же методике, что и для всего водохранилища. Разброс температур при увеличении скорости ветра до максимального значения достигает почти 2 градусов, при уменьшении - больше 1.5, что значительно превышает значения аналогичных оценок для всего Иваньковского водохранилища. Таким образом, в условиях мелководья и тепловой нагрузки влияние ветра на вертикальную структуру увеличивается.

Изменение характерных турбулентных масштабов, осредненных по объему залива, во времени, показало, что значения L_{int} меньше, примерно в 3 раза по сравнению с их величинами в водохранилище, а L_{Kol} не изменилось, как и следовало ожидать. Соотношение L_{int}/L_T уменьшилось, что свидетельствует о более равномерном распределении турбулентных вихрей или о меньшей анизотропии турбулентности.

Распределения во времени L_{int} и L_{Kol} осредненных по глубине, для выбранной точки, и для горизонта 0.1Н показали, что кривые пересекаются в моменты отсутствия ветрового воздействия и что при приближении к дну пересечений становится больше. Пересечения для данной точки с глубиной 1.8 м сохраняются до горизонта 0.7 Н. Отмечено, что такому сильному подавлению турбулентности могут способствовать значительные температурные градиенты, для оценки которых приведено вертикальное распределение температуры в рассматриваемой точке в момент отсутствия ветра. Такие градиенты могут быть обусловлены распространением тепловой струи от ГРЭС, и их влияние не компенсируется существенными вертикальными градиентами скорости течения, которые должны были бы способствовать развитию турбулентности. Значения коэффициента $\nu_T \approx 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с} \approx \nu$, $k \approx 10^{-8} \text{ м}^2 / \text{с}^2$, $\varepsilon \approx 10^{-9} \div 10^{-11} \text{ м}^2 / \text{с}^3$.

Таким образом был сделан вывод о том, что специфические условия Мошковического залива способствуют подавлению турбулентности и, как следствие, развитию зон, неблагоприятных с экологической точки зрения.

Выводы

1. Использование трехмерной математической модели, благодаря учету вертикальной структуры потока, позволило выявить влияние ее изменения на процессы массо- и теплообмена в Иваньковском водохранилище.
2. Для обеспечения необходимой информационной базы модели проведена серия подробных натурных исследований, в ходе которых основное внимание уделено измерению глубин, температуры воды

3. Сравнение результатов численного моделирования и данных натуральных наблюдений, проведенных автором и отраженных в других доступных источниках, показало хорошее совпадение в большей части моделируемой области водохранилища. Проведена оценка погрешностей расчетов мелководных зон, которая показала их незначительное влияние на термогидродинамическую структуру всего водохранилища.
4. Проведенный модельный эксперимент при экстремальных с точки зрения охлаждения водохранилища метеорологических условиях показал, что температура воды в водохранилище, особенно в его мелководных частях и в Мошковичевском заливе, подверженном влиянию подогретых вод Конаковской ГРЭС, может достигать значений, критических для существования экосистемы водохранилища и эксплуатации теплостанции, а зона влияния подогретых вод Мошковичевского залива увеличится до 1,5-2 км от его устья.
5. Проведены подробные натурные измерения и серия численных экспериментов для оценки термогидродинамического режима Мошковичевского залива и его влияния на акваторию Иваньковского водохранилища в целом.
6. Коэффициент корреляции рассчитанных и измеренных величин температуры воды в Мошковичевском заливе составляет 0,99. Отличия измеренной температуры воды от рассчитанной на большей части площади залива не превышает 0,5 °С, относительная средняя квадратическая ошибка составляет 3%. Анализ динамической и термической структуры Мошковичевского залива показал, что в заливе можно выделить 5 зон с различным динамическим и термическим режимом.
7. Анализ численных экспериментов дал возможность оценить влияние на термогидродинамический режим Мошковичевского залива телового сброса с Конаковской ГРЭС. Изменение вертикальной термической структуры залива под влиянием сбросных вод выражается прежде всего в уменьшении перепада температуры воды в южной зоне и увеличении амплитуды температуры воды по вертикали в остальной части.
8. Моделирование экстремального теплового режима и анализ вертикальной турбулентной структуры позволили выявить опасные с экологической точки зрения зоны, условия их формирования и развития и дать оценку возникновения ситуаций, ограничивающих характеристики эксплуатации Мошковичевского залива как водоема-охлаждителя.

Публикации

Журналы рекомендованные ВАК для публикации результатов диссертации:

1. *Дебольская Е.И., Якушев Е.В., Кузнецов И.С., Саминский Г.А.* Математическая модель процесса анаэробного заражения в водоемах // Вода: химия и экология., ООО Издательство «Креативная экономика», Москва № 12 за 2011 год, стр. 8-17.
2. *Саминский Г.А.* Моделирование термогидродинамического режима Иваньковского водохранилища // Вестник РУДН, секция Инженерные исследования, Издательство РУДН, Москва, №4, 2013, 10 стр (в печати)
3. *Саминский Г.А.* Моделирование термогидродинамического режима Мошковичевского залива Иваньковского водохранилища, как водоема-охлаждителя. // Вестник РУДН, секция Инженерные исследования, Издательство РУДН, Москва, №1, 2014, 8 стр. (в печати)

Главы в монографиях:

4. *Алексеевский Н.И., Кузьмина Е.О., Магрицкий Д.В., Саминский Г.А.* Многолетняя изменчивость термического режима рек // Закономерности гидрологических процессов. Под редакцией Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2012. – стр. 399-422.
5. *Алексеевский Н.И., Саминский Г.А.* Изменение температуры речной воды в период открытого русла // Закономерности гидрологических процессов. Под редакцией Н.И. Алексеевского. М.: ГЕОС, 2012. – стр. 232-238.

Материалы конференций

6. *Саминский Г.А.* Факторы и особенности изменения температуры воды по длине Северной Двины. Труды VII конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». Москва, РУДН, 2009 – стр. 232-240.
7. *Saminskiy G., Debolskaya E.* Mathematical modeling of the thermal and hydrodynamic structure of the cooling reservoir // EGU2012-6141.
8. *Саминский Г.А.* Термогидродинамический режим Мошковичевского залива Иваньковского водохранилища // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: тр. Междунар. науч.-практ. конф. (28 мая – 30 мая 2013г., Пермь): в 3т. Т. 1: Управление водными ресурсами. Гидро- и геодинамические процессы / науч. ред. А.Б. Китаев, О.В.Ларченко; Перм. гос. нац. исслед. ун-т – Пермь, 2013. – стр. 297-302.
9. *Саминский Г.А.* Мошковичевский залив Иваньковского водохранилища: температурный и динамический режим // Ледовые и термические процессы на водных объектах России: научные труды IV Всероссийская конференция // ФГБУН Институт водных проблем Российской академии наук. – М.: Издательство КЮГ, 2013. «Ледовые и термические процессы на водных объектах России» - с. 293-297.