

Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации  
Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды  
(Росгидромет)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«СИБИРСКИЙ РЕГИОНАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»  
(ФГБУ «СибНИГМИ»)

УДК 556.013:556.536.2:556.555

№ госрегистрации 01201180380

Инв. №



УТВЕРЖДАЮ

Директор ФГБУ «СибНИГМИ»

д. ф.-м. н.

В.Н. Крупчатников

декабрь 2013 г.

ОТЧЕТ

О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Разработать 2.5-D модель гидрологического и термического режимов Телецкого озера с учетом боковой приточности и нестационарного метеорологического форсинга на площади водосбора

(заключительный)

Шифр темы: 1.1.8.12

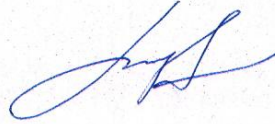
Научный руководитель:  
д.ф.-м.н., профессор

Пушистов П.Ю.

Новосибирск 2013

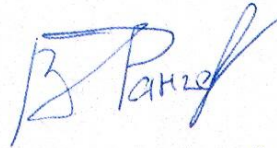
## Список исполнителей

Руководитель темы,  
главный научный сотрудник  
Лаборатории информационного  
обеспечения численных прогнозов  
погоды, д.ф.-м.н., профессор



П.Ю. Пушистов

Исполнитель темы,  
научный сотрудник  
Лаборатории информационного  
обеспечения численных прогнозов



В.Н. Данчев

Нормоконтролер



Т.П.Панькова

## РЕФЕРАТ

Отчет 125 с., 58 рис., 6 табл., 143 источника, 1 приложение.

### ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС, ТЕЛЕЦКОЕ ОЗЕРО, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ, ГИДРОЛОГИЧЕСКИЙ И ТЕРМИЧЕСКИЙ РЕЖИМЫ

Объектом исследования является открытая для внешних геофизических воздействий единая лимнологическо-гидрологическая система, включающая в себя: 1) участок реки Чулышман от г/п Балыкча до устья реки, 2) устье реки Чулышман, 3) меридиональную и широтную части Телецкого озера, включая Кыгинский и Камгинский заливы, 4) исток реки Бии, 5) устьевые зоны наиболее крупных боковых притоков к озеру (реки Кокши, Большие Чили, Кыга, Камга, Колдор, Самыш), а также береговые или буферные зоны Телецкого озера и участка реки Чулышман.

Цель работы состоит в создании и верификации информационно-вычислительного комплекса и в изучении на его основе гидродинамического и термического режимов Телецкого озера при различных сценариях задания переменных метеорологических и гидрологических внешних воздействий.

В отчете содержится информация по созданию и верификации информационно-вычислительного комплекса, предназначенного для воспроизведения переменных гидродинамики и термического режима Телецкого озера – крупнейшего лимнологического объекта бассейна реки Обь. Поэтапно сформированный информационно-вычислительный комплекс (ИВК) состоит из четырех модулей: 1) модуль генерации модели сетки – WMS ([www.aquaveo.com](http://www.aquaveo.com)); 2) базовый прогностический модуль ИВК – двумерная продольно-вертикальная численная модель гидродинамики и качества воды CE-QUAL-W2 ([www.cee.pdx.edu](http://www.cee.pdx.edu)); 3) модуль пре- и постпроцессорной обработки входной и выходной информации – W2i и AGPM-2D ([www.loginetics.com](http://www.loginetics.com)); 4) база данных для обеспечения работы модулей 1–3. Указанный информационно-вычислительный комплекс, в котором область моделирования рассматривается как единая лимнологическо-гидрологическая система: устьевой участок р. Чулышман – Телецкое озеро (включая Кыгинский и Камгинский заливы) с основными наиболее крупными боковыми притоками – исток р. Бии, позволяет комплексно исследовать гидротермодинамические процессы Телецкого озера во взаимосвязи с внешними геофизическими (гидрологическими и метеорологическими) воздействиями. Внешние геофизические воздействия в численных экспериментах с ИВК представлены либо в виде квазирегулярных (долгопериодных) сезонно-климатических изменений метеорологических и гидрологических переменных, полученных по данным наблюдений с декадным осреднением за период с 1968 по 1972 гг., либо характеризуются квазистохастической (средне- и краткосрочной) изменчивостью указанных переменных по суточным и синоптическим данным наблюдений за 1968 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	5
1 Обзор экспериментальных исследований и работ по феноменологическому и численному моделированию Телецкого озера и некоторых озер-аналогов .....	9
1.1 Объект и необходимость моделирования .....	9
1.2 Обзор экспериментальных исследований и работ по феноменологическому моделированию циркуляций и термического режима Телецкого озера и некоторых озер-аналогов.....	12
1.3 Обзор работ по численному моделированию гидротермодинамического режима Телецкого озера и некоторых озер-аналогов .....	21
2 Информационно-вычислительный комплекс гидродинамики и термического режима Телецкого озера.....	25
2.1 Модульная структура и функциональные возможности ИВК «Телецкое озеро» .....	25
2.1.1 Исходные уравнения, краевые и начальные условия, численная реализация, файловая структура, возможности и ограничения модели гидродинамики и качества воды CE-QUAL-W2..	27
2.1.2 Модули генерации файла батиметрии и пре- и постпроцессорной обработки входной и выходной информации. База данных для обеспечения работы модулей ИВК.....	34
2.2 Технология и результаты автоматизированной генерации файла батиметрии Телецкого озера и устьевое участка реки Чулышман .....	36
2.3 Проблемы и программа калибровки и верификации ИВК «Телецкое озеро» .....	43
3 Численное исследование динамики проникновения вод реки Чулышман в меридиональную часть Телецкого озера в период весеннего половодья .....	55
3.1 Численное воспроизведение стадий проникновения речных вод в глубокое межгорное озеро, описываемых гипотетической схемой Кармака. Оценки влияния начальной температуры озера на циркуляции схемы Кармака .....	55
3.2 Результаты моделирования динамики проникновения вод реки Чулышман в Телецкое озеро в период весеннего половодья при реальной начальной температуре водоема и различных сценариях задания параметров сезонного внешнего метеорологического воздействия .....	64
4 Численное исследование термического режима и циркуляций Телецкого озера в периоды весеннего и летнего нагревания при сезонной изменчивости параметров внешних метеорологических и гидрологических воздействий .....	70
<b>4.1 Результаты численного исследования механизмов возникновения и перемещения речного и озерного термических баров в меридиональной и широтной частях Телецкого озера .....</b>	<b>70</b>
4.2 Результаты численного исследования механизмов возникновения и перемещения термических баров Кыгинского и Камгинского заливов.....	81
5 Оценка прогностических возможностей ИВК «Телецкое озеро» по численному воспроизведению особенностей термического режима водоема при прямом учете внутрисуточной и синоптической изменчивости переменных метеорологических и гидрологических внешних воздействий по данным наблюдений за апрель-июль 1968 года.....	90
5.1 Анализ результатов прогнозов температуры воды в поверхностном и придонном слоях Телецкого озера.....	92
5.2 Качественное и количественное сравнение расчетных и измеренных вертикальных профилей температуры воды Телецкого озера .....	102
Заключение .....	108
Список использованных источников .....	110
Приложение А .....	123

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование гидротермодинамических процессов в глубоких стратифицированных озерах относится к числу наиболее важных задач физической лимнологии и является основой для изучения гидрохимических и гидробиологических процессов в них. Для крупных озер с большим временем полного водообмена атмосферные воздействия (ветровой режим и теплообмен на поверхности водоема) оказываются доминантно значимыми при формировании циркуляции и термического режима таких водоемов. Для проточных озер небольших размеров с малыми значениями времени водообмена важным становится взаимодействие между водоемом и протекающими через него речными водами, в результате чего приток и отток рек в значительной мере определяют термодинамический режим таких водоемов. Большое число озер, включая Телецкое, оказываются в средней части спектра времени полного водообмена. Циркуляции и термический режим таких озер находятся как под влиянием притока и оттока речных вод, так и существенно зависят от характеристик атмосферных воздействий, процессов внутренней термодинамики и морфометрии водоемов. Изучение природных механизмов, влияющих на циркуляции и распределение водных масс в таких озерах, а также оценка антропогенных воздействий, влияющих на показатели качества воды, представляют несомненный научный и практический интерес.

В виду многообразия и сложности процессов, определяющих циркуляции и термический режим озер и водохранилищ, эффективным средством оценки и прогноза переменных гидротермодинамики является математическое моделирование. Использование математического моделирования и проведение вычислительного эксперимента позволяют оценивать природоохранные аспекты и последствия реализации проектов, связанных с антропогенным воздействием на водные экосистемы и разрабатывать эффективные системы предупреждения гидрологических и экологических чрезвычайных ситуаций [1, 2, 11, 12, 41, 43; 47, 51, 70, 123, 126, 130 и др.].

В течение трех последних десятилетий в результате перехода на принципы и технологии интегрированного управления водными ресурсами [31, 94, 114, 119 и др.] водохозяйственные и природоохранные организации развитых стран массово применяют как относительно простые численные модели гидравлики, транспорта наносов и русловых деформаций речных систем и каналов, так и более сложные информационно-вычислительные комплексы (ИВК) гидродинамики и качества воды рек, озер, водохранилищ и эстуариев с учетом различных гидротехнических сооружений и источников загрязняющих веществ для решения широкого круга практических задач в сфере планирования, проектирования и управления ресурсами поверхностных и подземных вод [123, 126, 138 и др.]. Упомянутые численные модели и ИВК, вместе с моделями

водосборных бассейнов типа «осадки–сток» и эколого-экономическими ИВК, служат прогностическим ядром вычислительной основы инновационных систем поддержки принятия решений при интегрированном управлении речными бассейнами [13, 22, 31, 53, 93, 103, 123, 126 и др.].

Нарастающая потребность в компьютерных инструментах, позволяющих с приемлемой для практики точностью оценивать и прогнозировать экосистемные (физические, химические, биологические) процессы и явления в водных объектах при прошлых, настоящих и будущих (сценарных) условиях окружающей среды, привела к формированию на рынке программных продуктов для решения задач использования и охраны природных ресурсов сектора средств имитационного и оптимизационного моделирования гидродинамики и качества поверхностных и подземных вод [23, 55, 57, 115, 123, 138 и др.]. В то же время при всем разнообразии программных продуктов данного сектора, номенклатура которого насчитывает многие десятки, если не сотни наименований (см., например, [9, 57, 83, 115, 140, 142]), встает проблема выбора наиболее подходящих из них для адекватного воспроизведения процессов и явлений, происходящих в конкретном водном объекте.

Цель работы состоит в создании и верификации информационно-вычислительного комплекса и в изучении на его основе гидродинамического и термического режимов Телецкого озера при различных сценариях задания переменных метеорологических и гидрологических внешних воздействий.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Подготовить обзор экспериментальных исследований и работ по феноменологическому и численному моделированию циркуляций и термического режима Телецкого озера и некоторых озер – аналогов.

2. Создать тематическую базу данных, содержащую картографический материал, необходимый для обеспечения «информационного покрытия» области моделирования и гидрометеорологические данные, полученные с пунктов наблюдений Озерной станции Западно-Сибирского УГМС, необходимые для задания начальных и краевых условий, а также для калибровки и верификации численной модели CE-QUAL-W2.

3. Сформировать высокотехнологичный информационно-вычислительный комплекс, предназначенный для детального воспроизведения в пространстве и времени переменных гидродинамики и термического режима Телецкого озера и устьевого участка реки Чулышман.

4. Провести численное исследование механизмов формирования термического режима и циркуляций Телецкого озера при различных сценариях задания переменных метеорологических и гидрологических внешних воздействий. Осуществить верификацию информационно-вычислительного комплекса на основе сравнения результатов расчетов с данными наблюдений.

Для решения выше перечисленных задач в НИР использован метод прикладного системного анализа водных объектов/экосистем, включая интегрированную реализацию следующих его этапов: реальный объект → экспериментальное и теоретическое изучение объекта → феноменологическая/концептуальная модель → математическая модель → имитационная/численная модель → испытание и анализ численной модели (калибровка, верификация, анализ чувствительности и неопределенностей) → получение новых знаний об объекте [53, 58, 71, 123].

Сформированный информационно-вычислительный комплекс, адаптирован для численного моделирования уровня режима, полей скоростей течения, температуры воды и динамики ледового покрова Телецкого озера (включая Кыгинский и Камгинский заливы), с расчетом соответствующих переменных устьевого участка реки Чулышман, на периоды весеннего и летнего нагревания при сезонной, синоптической и суточной пространственно-временной изменчивости переменных метеорологических и гидрологических внешних воздействий (далее ИВК «Телецкое озеро»).

Анализ результатов проблемно-ориентированных численных экспериментов с ИВК «Телецкое озеро» позволил решить три конкретные задачи, которые являются новыми или имеют значительные элементы новизны.

1. Изучить динамику проникновения вод реки Чулышман в меридиональную часть Телецкого озера в период весеннего половодья.

2. Исследовать механизмы циркуляций и динамики термического режима Телецкого озера при сезонной изменчивости параметров метеорологических и гидрологических внешних воздействий по данным за 1968-1972 гг. В частности, изучены процессы формирования, перемещения и слияния термических баров Телецкого озера в периоды весеннего и летнего нагревания, включая:

- речной термический бар (возникает преимущественно за счет поступления вод реки Чулышман и перемещается в меридиональной части озера с юга на север);
- классический озерный термический бар (возникает на мелководном участке северо-западной части озера и перемещается с запада на восток);
- локальные термические бары в Кыгинском и Камгинском заливах (возникающие как за счет наличия мелководных зон, так и притока речных вод).

3. Дать количественную оценку прогностических возможностей ИВК «Телецкое озеро» по численному воспроизведению детальной структуры термического режима водоема при прямом учете фактической внутрисуточной и синоптической изменчивости переменных метеорологических и гидрологических внешних воздействий за период с 1 апреля по 1 августа 1968 года.

Сформированный информационно-вычислительный комплекс «Телецкое озеро» является высокотехнологичным инструментом для проведения фундаментальных и прикладных научных исследований гидродинамики и термического режима Телецкого озера. В отчете показано, что этот комплекс обладает широкими прогностическими возможностями и может быть использован как один из базовых компонентов вычислительной основы при разработке системы поддержки принятия решения при интегрированном управлении бассейном и экосистемой Телецкого озера. Информационно-вычислительный комплекс также может быть использован при планировании программ будущих экспериментальных исследований Телецкого озера, например, при проведении экспедиционных работ, нацеленных на более полное изучение динамики термических баров водоема. В дальнейшем информационно-вычислительный комплекс может быть дополнен модулем качества воды для воспроизведения разномасштабных физических, химических и биологических процессов Телецкого озера при различных сценариях внешних экосистемных воздействий, включая учет региональных проявлений глобального изменения климата.

Достоверность полученных результатов в процессе выполнения НИР подтверждена сопоставлением результатов численного моделирования с данными, полученными с пунктов наблюдений Озерной станции Западно-Сибирского УГМС, а также путем сравнения результатов расчетов с феноменологическими моделями циркуляций и термического режима Телецкого озера и некоторых озер-аналогов.



# 1 Обзор экспериментальных исследований и работ по феноменологическому и численному моделированию Телецкого озера и некоторых озер-аналогов

## 1.1 Объект и необходимость моделирования

Водными объектами, для которых разработан представленный во введении информационно-вычислительный комплекс, являются устьевой участок реки Чулышман, Телецкое озеро с основными наиболее крупными боковыми притоками (р. Кокши, Большие Чили, Кыга, Камга, Колдор, Самыш) и исток реки Бии. Телецкое озеро – крупнейший водоем бассейна реки Обь [19, 62, 64, 67, 73]. Оно расположено в северо-восточной части Горного Алтая на высоте 434 м над уровнем моря и входит в единую озерно-речную систему Восточного Алтая «Чулышман – Телецкое озеро – Бия». Водосборный бассейн площадью 20400 км<sup>2</sup> при средней высоте 1940 м представляет собой горную область, вытянутую с юго-востока на северо-запад. С севера озеро ограничивает относительно невысокий хребет Торот (1342 м), а с запада и юго-запада хребты Алтынту, Сумультинский и Иолго с абсолютными высотами 2000 – 3300 м. На востоке лежат хребты Корбу и Абаканский, с юга к озеру примыкает край обширного Чулышманского нагорья.

Котловина Телецкого озера имеет вытянутую руслообразную форму, отличается прямолинейностью и практически лишена заливов (озеро имеет всего два крупных залива – Камгинский на севере и Кыгинский в южной части), бухт и полуостровов. Озеро состоит из двух частей: северной субширотной, длиной 38,2 км (включая Камгинский залив) и субмеридиональной, вытянутой на 47,6 км. Эти части различны по морфометрическим характеристикам, строению дна и берегов, ледово-термическим, ветро-волновым и другим особенностям климатического режима. Средняя и максимальная ширина озера равна 2,89 и 5,2 км, соответственно, площадь зеркала – 227,3 км<sup>2</sup>. Благодаря большой глубине (средняя глубина озера 181 м, максимальная – 323 м) в озере содержится огромное количество пресной воды (объем воды в котловине 41,1 км<sup>3</sup>), прозрачность которой достигает 12 – 15 метров. Впадает в озеро около 70 рек и 150 временных водотоков, причем более 70 % всей поступающей воды даёт река Чулышман. Большинство притоков берет начало из небольших, но многочисленных (более 2200) высокогорных озёр в бассейне озера. Наиболее крупными притоками, после р. Чулышман, являются реки – Кыга, Большие Чили, Кокши, Камга, Колдор и Самыш. Вытекает из Телецкого озера река Бия, которая, сливаясь с Катунью, образует реку Обь [65–67].

Общие особенности гидротермического режима Телецкого озера определяются погодно-климатическими факторами, притоком и оттоком речных вод, процессами внутренней гидротермодинамики и характеристиками морфометрии водоема. Согласно публикациям [62–64], климат и метеорологические условия долины и бассейна Телецкого озера формируются в

результате взаимодействия общей и местной циркуляции атмосферы, солнечной радиации, орографии водосборного бассейна и водной массы озера. В долине глубоководного, орографически изолированного Телецкого озера озерный климат максимально проявляется в весенне-летний период (с мая по август) в режимах температуры, влажности воздуха и атмосферных осадков. Характерные черты лимноклимата этого периода выражаются в усилении температурных инверсий, развитии бризовых, горно-долинных и склоновых ветров и туманов конденсации за счет значительной положительной разницы температур «суша-озеро» на фоне преобладающих влажноадиабатических процессов [62]. В осенне-зимний период (октябрь-март) лимноклиматические факторы в значительной мере сохраняются и максимально проявляются в разрушении температурных инверсий относительно теплыми водными массами долго (или совсем) незамерзающего озера, в формировании сложного и длительного ледового режима, а также – в создании благоприятных условий для развития процессов испарения на фоне значительной отрицательной разницы температур «суша-озеро» [62]. Телецкое озеро характеризуется своеобразным ветровым режимом [64], с преобладанием двух типов ветров, вызываемых общей атмосферной циркуляцией, направление которых определяется в основном ориентацией долины. Это «верховки» – ветры восточной и южной четверти и «низовки» – ветры западной и северной четверти. Своеобразен ледовый режим Телецкого озера [64]. Своеобразие это проявляется прежде всего в отсутствии ежегодного полного ледостава на озере, весьма затянутых периодах замерзания (до 4 месяцев) и вскрытия (около 2 месяцев).

Уровенный режим Телецкого озера определяется [64] как типично речной. Это обусловлено характерной «руслоподобной» геометрией котловины озера (соотношение ширины озера к его длине составляет 1:27) и тем, что основной приток – р. Чулышман и сток – р. Бия, расположены на противоположных концах озера, южном и северо-западном, соответственно. Сезонные колебания уровня воды находятся в пределах 3 – 4 м, максимальная амплитуда колебания уровня составляет 6,08 м, средняя – 3,59 м. Несмотря на то, что Телецкое озеро – димиктическое, с двумя периодами (май-июль и октябрь-декабрь) полного конвективного перемешивания до максимальных глубин, диапазон годовых колебаний температуры воды в глубоководной части озера составляет всего 1,9 – 4,8 °С, а в северо-западном мелководье – 2–11 °С [65–67].

Телецкое озеро, по определению В.В. Селегея [67, с. 96], – «совершенный памятник природы и по праву является гордостью не только Алтая, Сибири, но и всей России как один из ее живописнейших уголков, достойных постоянного внимания россиян и зарубежных гостей». Закон Республики Алтай «Об охране Телецкого озера» от 09.07.2004 объявляет озеро «ценной и особо охраняемой природной территорией» (ст. 1). Как объект Всемирного природного наследия, Телецкое озеро в 1998 году включено в реестр ЮНЕСКО «Золотое нагорье Алтая». И если в предисловии монографии В.В. Селегей и Т.С. Селегей, изданной в 1978 году, констатируется, что

«Телецкое озеро – уникальный природный водоем, расположенный в заповедной зоне вне пределов хозяйственной деятельности человека», то за последние десятилетия ситуация с антропогенной нагрузкой на бассейн и экосистему озера резко изменилась. В работе [85] на основе анализа использования природных систем бассейна Телецкого озера выделено 5 классов геосистем по преобладающему типу антропогенного воздействия:

- селитебные, которые сосредоточены, главным образом, на северо-западной и северной оконечностях озера (села Артыбаш и Июгач), а также по кордонам заповедника (поселки Яйлю и Беле);

- горнопромышленные, оказавшие в отдельных местах, несмотря на свою локальность, существенное влияние на трансформацию естественной структуры ландшафтов;

- лесохозяйственные, занимающие практически полностью левобережную (западную) часть бассейна озера;

- сельскохозяйственные (для региона характерно незначительное количество площадей сельскохозяйственного землепользования, за исключением южной, прилегающей к более континентальным районам Алтая, части);

- рекреационные, представляющие собой антропогенно-измененные природные комплексы, непосредственно связанные с массовым отдыхом и туризмом.

Уже сейчас количество туристов, приезжающих отдохнуть на озеро, в два – три раза больше, чем это было десять лет назад (по разным оценкам [92], в последние годы озеро посещают от 150 до 250 тыс. человек в год). Развитие туристической индустрии приводит к быстрому росту и интенсивной эксплуатации озерного флота. Суммарная мощность судовых двигателей всех типов на озере увеличилась более чем в 25 раз за последние пять – шесть лет. Значительная часть продуктов сгорания топлива поступает в воду, бензиновая и масляная пленки на воде летом – обычное явление в районе поселка Артыбаш [20]. Среди других проблем, волнующих экологическую общественность, следует отметить практически бесконтрольный сетевой лов рыбы, который приобрел за последние годы «просто катастрофические размеры» [20], и интенсивное загрязнение акватории озера и его берегов твердым бытовым мусором. Научно обоснованная система оперативного контроля и управления антропогенной нагрузкой на акваторию и бассейн Телецкого озера отсутствует.

Таким образом, проблема разработки методики расчета допустимых антропогенных нагрузок на экосистему Телецкого озера является актуальной, и решать ее, по-видимому, целесообразно в рамках проекта создания системы поддержки принятия решений при интегрированном управлении бассейном и экосистемой озера [13, 31, 53, 123]. Пример успешного и инновационного, по своей сути, проекта обоснования норм антропогенных нагрузок (TMDL – суммарная максимальная суточная нагрузка) на экосистему глубокого горного озера Ватком

(США) приведен в работах [96, 121]. Инструментом анализа TMDL озера Ватком является единый информационно-вычислительный комплекс, включающий в себя модель гидродинамики и качества воды CE-QUAL-W2 [96] для описания динамики экосистемы озера и модель экосистемы бассейна озера - HSFP (Фортран-программа гидрологического моделирования) [121]. Близкий по замыслу проект, дополнительно предполагающий включение в состав ИВК численных моделей динамики погодно-климатического форсинга на площади водосбора Телецкого озера, представлен авторами отчета совместно с В.В. Кирилловым и А.В. Дьяченко, в работе [107]. Однако прежде чем переходить к описанию ИВК «Телецкое озеро», целесообразно дать краткий обзор экспериментальных исследований и работ по феноменологическому и численному моделированию Телецкого озера и некоторых озер-аналогов.

## **1.2 Обзор экспериментальных исследований и работ по феноменологическому моделированию циркуляций и термического режима Телецкого озера и некоторых озер-аналогов**

История исследования Телецкого озера берет свое начало в XVIII веке и подробно описана в публикациях [64–67, 73]. Значительной вехой в экспериментальном изучении озера является 1965 год, когда на базе метеорологической станции поселка Яйлю была открыта Озерная станция Западно-Сибирского УГМС. С этого года начинаются стационарные наблюдения за ветро-волновым, ледово-темическим, гидрохимическим и метеорологическим режимами озера, организуются регулярные наблюдения за испарением с водной поверхности, актинометрические, шаропилотные, аэрологические и другие виды наблюдений, проводятся водно- и тепло-балансовые расчеты, выполняются промерные работы, развивается сеть постов, как на самом озере, так и на его притоках (рис. 1.1). Именно период наблюдений с 1965 г. по 1975 г. характеризуется относительно развитой сетью гидрометеорологических станций и постов и значительными объемами полевых работ. В прибрежной части озера (рис. 1.1) находятся две метеорологические станции: м/с Яйлю, расположенная в 250 м от берега и на высоте 43 м над уровнем озера, характеризует метеорологические условия широтной части озера и м/с Беле (120 м над уровнем озера, 300 м от берега), которая характеризует метеорологические условия меридиональной части озера. Гидрологические наблюдения в этот период проводились на 5 речных (р. Чулышман – г/п Балыкча, Чири, Кокши, Чеченег, исток р. Бия – г/п Артыбаш) и 4 озерных (с. Артыбаш, пос. Яйлю, крд. Кокши, Кыгинский залив) гидрологических постах. Наблюдения за термическим режимом озера проводились на 10 рейдовых вертикалях (один раз в декаду) и 18 вертикалях гидрологических разрезов (один раз в месяц) в период открытой воды с использованием экспедиционного судна Озерной станции и регламента экспедиционных работ [48]. Рейдовые вертикали расположены следующим образом: номер 19 – в районе м. Кырсай на

расстоянии 2,6 км от устья р. Чулышман (средняя глубина измерений 155 м); 27 – в районе р. Челюш на расстоянии 17 км от устья р. Чулышман (средняя глубина – 280 м); 13 – в районе р. Кокши на расстоянии 27 км от устья р. Чулышман (средняя глубина – 285 м); 26 – в районе р. Корбу на расстоянии 42 км от устья р. Чулышман (средняя глубина – 323 м); 6 – в районе п. Яйлю на расстоянии 50,2 км от устья р. Чулышман (средняя глубина – 256 м); 24 – в районе м. Ажи на расстоянии 57 км от устья р. Чулышман (средняя глубина – 215 м); 23 – в районе м. Караташ на расстоянии 65,4 км от устья р. Чулышман (средняя глубина – 14 м); 22 – в районе с. Артыбаш на расстоянии 74,8 км от устья р. Чулышман (средняя глубина – 10 м); 25 – в Камгинском заливе на расстоянии 2,8 км от устья р. Камга (средняя глубина – 39 м); 28 – в Кыгинском заливе на расстоянии 1,3 км от устья р. Кыга (средняя глубина – 100 м).

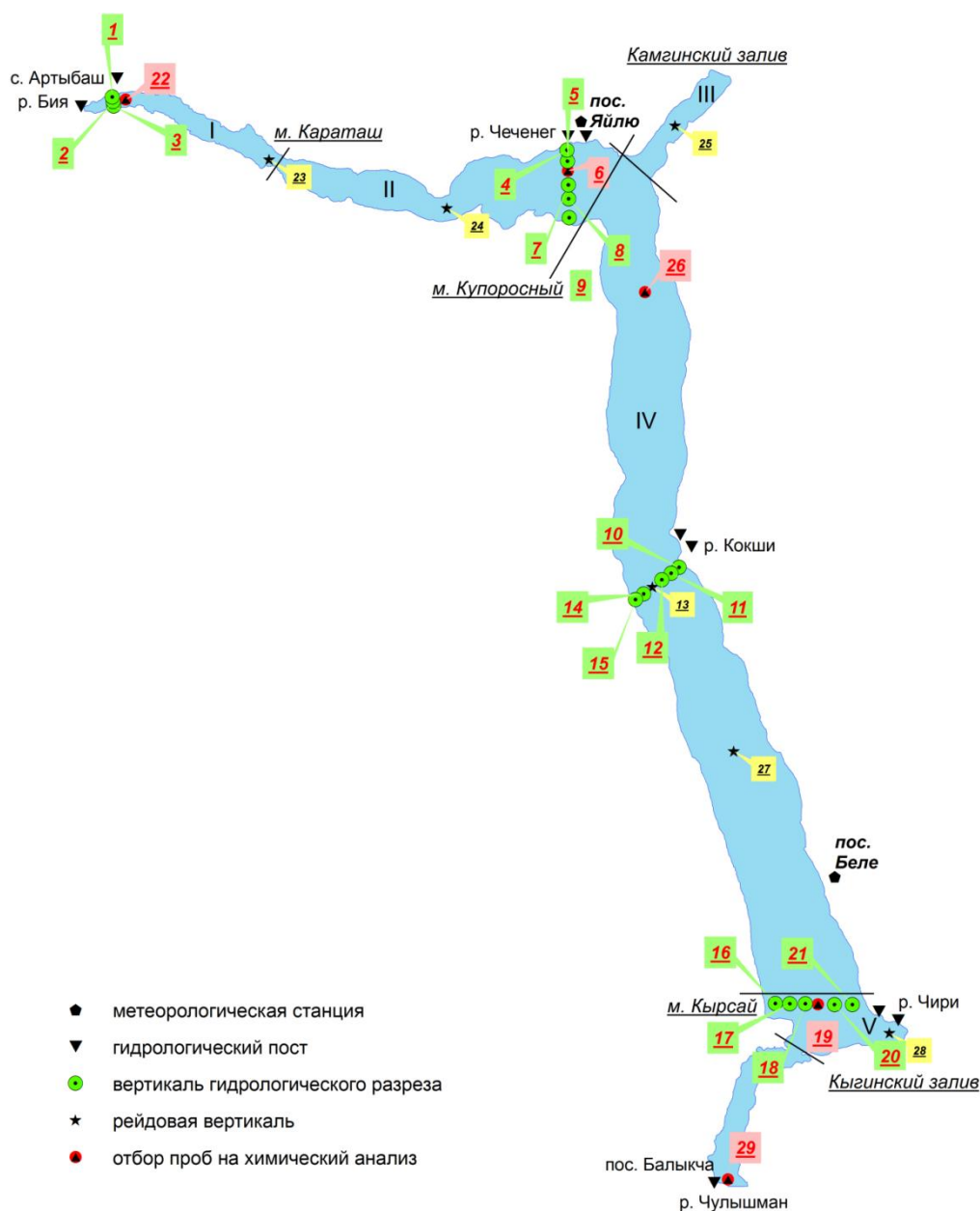


Рисунок 1.1 – Схема расположения гидрометеорологических станций, рейдовых вертикалей и гидрологических разрезов на Телецком озере за 1965-1975 гг. [64]

По результатам комплексных наблюдений за период с 1965 по 1975 гг. В.В. Селегею удалось разработать основу феноменологической модели гидрометеорологического режима Телецкого озера [64, 67]. В ней автор выделил 4 периода (лимносезона): 1 – период весеннего нагревания с формированием озерного (классического) термического бара на мелководном северо-западном участке озера; 2 – период летнего нагревания с различными типами вертикальной стратификации и влияния ветрового воздействия; 3 – период осеннего охлаждения с двумя последовательными фазами: первая – в условиях прямой стратификации до момента возникновения термического бара (с реализацией механизмов перемешивания водных масс всей толщи озера при штормах) и вторая – при наличии термического бара; 4 – период зимнего минимума, который начинается с момента установления по всему озеру осенней гомотермии и продолжается в состоянии обратной стратификации в течение четырех месяцев с первых чисел декабря до первой декады апреля. При разработке феноменологической модели автор разделил всю акваторию озера, с учетом разнообразия глубин и температурного режима, на пять участков (I-V), которые показаны на рис. 1.1. Участок I расположен на северо-западе озера от истока р. Би до м. Караташ (площадь – 9,6 км<sup>2</sup>, средняя глубина – 10 м, объем – 0,1 км<sup>3</sup>); II – от м. Караташ до м. Купоросный (площадь – 41,2 км<sup>2</sup>, средняя глубина – 160 м, объем – 6,6 км<sup>3</sup>, максимальные глубины изменяются от 100 до 300 м); III – Камгинский залив (площадь – 7,2 км<sup>2</sup>, средняя глубина – 28 м, объем – 0,2 км<sup>3</sup>, максимальные глубины изменяются в диапазоне 40–180 м); участок IV, самый большой по площади (136,3 км<sup>2</sup>) и объему (29,9 км<sup>3</sup>), включает в себя большую часть меридиональной акватории озера и простирается от м. Купоросный до м. Кырсай. Средняя глубина этого участка – 219 м, максимальные глубины изменяются от 150 до 323 м. Участок V расположен на крайнем юге Телецкого озера, включает в себя Кыгинский залив и акваторию озера, непосредственно примыкающую к устью реки Чулышман (площадь участка – 28,7 км<sup>2</sup>, объем – 2,7 км<sup>3</sup>, средняя глубина – 94 м, максимальные глубины изменяются от 100 до 150 м).

Поскольку тщательность проработки этапа феноменологического моделирования, согласно базовым принципам прикладного системного анализа [71], доминантно определяет успешность последующих этапов создания, калибровки и верификации численной модели конкретного водного объекта, остановимся более подробно на анализе основных процессов лимносезонной термодинамики, включенных в концептуальную модель Селегея.

*Период весеннего нагревания.* Начинается с момента, когда тепловой баланс озера переходит через нулевое значение и в последующее время остается положительным, до момента, когда температура воды в любой точке на поверхности озера достигает значения температуры максимальной плотности ( $T_{md} \approx 4$  °C). Датой начала фазы весеннего нагревания для пос. Беле в среднем за многолетний период является 1 апреля, для пос. Яйлю – 5 апреля, для с. Артыбаш – 7 апреля. К моменту начала весеннего нагревания температура поверхности воды в озере достигает

0,4 – 0,8 °С, у дна 2,2 – 2,8 °С. При этом в глубинных слоях ярко выражена обратная стратификация.

Напомним, что согласно классической интерпретации [74, 76–78, 118] весеннее нагревание озера, температура поверхности воды которого оказывается ниже, чем  $T_{md}$ , приводит первоначально к увеличению температуры (плотности) поверхностного слоя воды. Опускание этой воды вниз, в виде крупновихревой проникающей конвекции совместно с ветровым турбулентным перемешиванием, приводит к установлению изотермических условий в столбе воды, и озеро «опрокидывается». В достаточно глубоких озерах результирующая термическая структура может незначительно видоизменяться, например, за счет изменений  $T_{md}$  с глубиной [131] или из-за присутствия растворенных солей [102].

Весенняя гомотермия в глубоководной части Телецкого озера (участки II и IV, см. рис. 1.1) наступает в конце мая - начале июня при температуре воды 2,8 – 3,0 °С, на северо-западном мелководном участке – в первой декаде июня при температуре 3 – 4 °С, в заливе Камга – в середине мая при температуре 2,2 – 3,0 °С.

Вторая фаза весеннего нагревания, согласно феноменологической модели Селегея, начинается при переходе температуры воды в поверхностном слое через  $T_{md}$  в мелководном северо-западном участке озера и установления в нем термического бара. Отметим, что термодинамика классических термических баров в крупных озерах, имеющих умеренно наклоненные борта котловины и, соответственно, значительные площади прибрежных мелководий, хорошо изучена как с помощью различных систем наблюдений, так и посредством разработки и верификации двумерных и пространственных численных моделей [6, 18, 24, 25, 42, 49, 68, 74, 86–90, 120, 124, 137, 143 и др.]. Установлено, что в таких озерах весеннее нагревание последовательно распространяется внутрь озера от его берегов с первоочередным прогревом вод прибрежного мелководья. Следовательно, термический бар формируется вокруг периметра озера и разделяет гидростатически устойчивую прибрежную воду (с температурой выше  $T_{md}$ ) от более холодной воды в открытом озере (с температурой ниже  $T_{md}$ ). Вода внутри термического бара, имея максимальную плотность, опускается вниз, и в то же время происходит компенсационный подъем вод, расположенных ближе к берегу и в сторону открытого озера [106, 111]. Как отмечено в работе [75], поверхностные течения от береговой зоны и из открытого озера сходятся на термическом баре и перемешиваются здесь, образуя при этом дополнительные объемы воды с температурой максимальной плотности. Продолжающееся нагревание весной заставляет термический бар перемещаться все дальше и дальше в открытое озеро вплоть до окончательного нагревания всего озера выше  $T_{md}$ .

На Телецком озере описанный выше классический термический бар начинает формироваться в середине мая, прежде всего, в прибрежных зонах северо-западного мелководного

участка. В первой декаде июня активная область термического бара отмечается в районе с. Артыбаш. Далее фронт термического бара начинает перемещаться с запада на восток. К концу второй декады июня термический бар проходит м. Караташ, затем скорость перемещения фронта термического бара несколько замедляется за счет резкого возрастания глубин. На участке озера восточнее м. Ажи термический бар отмечается в первой декаде июля.

Появления фронта термического бара на юге меридионального участка озера, согласно многолетним данным гидрологического разреза м. Кырсай, приходится на середину июня. Время и природу возникновения, а также механизмы распространения этого термического бара автор описываемой феноменологической модели качественно и количественно не идентифицирует. Он лишь отмечает [64, с. 64], что «фронт термического бара можно обнаружить не только путем измерений, но и наблюдать непосредственно. На Телецком озере он хорошо заметен по границе мутных вод основного притока р. Чулышман». За период июнь – первая декада июля термический бар в меридиональной части озера перемещается с юга на север, проходя рейдовую вертикаль 27 (р. Челюш, см. рис. 1.1) во второй декаде июня, а гидрологический разрез р. Кокши – в первой декаде июля.

Скорость перемещения двух фронтов термических баров, движущихся навстречу друг другу, в первой декаде июля заметно возрастает. К середине июля эти фронты смыкаются и на этом, согласно феноменологической модели Селегея, завершается стадия весеннего нагревания Телецкого озера. После нагревания верхнего слоя озера выше 4 °С толща воды Телецкого озера разделяется на две части: в нижней сохраняется состояние гомотермии, в верхних слоях накопление тепла приводит к резкой прямой стратификации.

*Период летнего нагревания.* Этот период начинается с момента установления прямой температурной стратификации (вторая декада июля) и заканчивается прекращением прогрева воды в озере (конец августа). Общей особенностью летних условий является то, что озеро устойчиво стратифицировано и достигает температур на поверхности выше 10 °С. В конце июля температура воды на поверхности озера в районе п. Яйлю составляет 10 – 14 °С, в районе м. Кырсай она на 3–5 °С выше. В этот период изотерма 4 °С, отделяющая область более плотной воды от верхних устойчиво стратифицированных слоев, располагается на глубинах около 50–80 м. Слой перемешивания (эпилимнион) практически отсутствует, в отдельных случаях он имеет толщину всего 1–2 м. Термоклин начинается непосредственно от поверхности воды и имеет мощность 3–10 м с максимальными значениями вертикального градиента температуры – 0,8–1,0 °С / 1 м, в районе м. Кырсай его мощность увеличивается до 20 м, с локальными максимумами – 1,0–1,5 °С / 1 м. Примерно к 10 августа температура поверхности воды в районе п. Яйлю достигает значений 15–17 °С, а в районе м. Кырсай за счет притока теплых вод р. Чулышман – значений 18–20 °С, т. е. достигает своих максимальных значений. При этом изотерма 4 °С опускается на



глубину 80–100 м. В последние две декады августа накопленное тепло в поверхностном слое перераспределяется в глубинные слои. Так как ночные минимумы температуры воздуха в это время становятся ниже температуры поверхности воды, конвекция выравнивает температуру верхних слоев и образуется хорошо выраженный эпилимнион. Мощность эпилимниона в это время в районе п. Яйлю составляет 5–10 м, в районе м. Кырсай – 15–20 м. Температура воды в эпилимнионе фиксируется в диапазоне 13–14 °С. Термоклин в районе п. Яйлю смещается на глубины 10–20 м, в районе м. Кырсай – на 20–40 м. Максимальные значения вертикального градиента температуры в термоклине снижаются до 0,3–0,5 °С / 1 м. Зона гиполимниона на участках II и IV начинается с глубин около 50 м и простирается до дна озера. Изотерма 4 °С опускается на глубину 100–120 м. Во второй половине августа эпилимнион часто разрушается при штормовых усилениях ветра и кривая вертикального распределения температуры после нового нагревания приобретает вид, близкий к характеру раннего лета.

*Период осеннего охлаждения.* Его первая фаза на Телецком озере начинается в конце августа – начале сентября. С началом осеннего охлаждения в термическом режиме озера возрастает роль проникающей конвекции, обусловленной понижением температуры воды на поверхности водоема. Вместе с тем за счет ветрового воздействия особенно при штормах создается сложная картина движения водных масс и часто происходит перемешивание всей толщи воды озера. Только осенью с усилением проникающей конвекции в Телецком озере образуется устойчивый эпилимнион и более или менее резко обозначается слой температурного скачка.

Так как охлаждение поверхности воды происходит быстрее, чем конвективное и ветровое перемешивание успевает выровнять возникающую разницу температур воды, вертикальное распределение температуры осенью оказывается слабоизотермичным. К концу октября температура всей толщи воды озера составляет 4–5 °С. Слой металимниона окончательно исчезает. В конце октября – начале ноября при нарастающем охлаждении и часто повторяющемся ветровом перемешивании температура воды в мелководных районах понижается значительно быстрее, чем в глубоководных областях на тех же горизонтах. За счет этого здесь формируется осенний термический бар и таким образом начинается вторая фаза осеннего охлаждения. Состояние осенней гомотермии, как и фронта термического бара, в Телецком озере устанавливается при температуре 4 °С или близкой к ней. В конце ноября состояние осенней гомотермии наступает вначале на крайнем северо-западном участке и с опозданием на 2–4 дня в районе м. Кырсай. Процесс распространяется с обоих концов озера в сторону глубоководной центральной части. Позже всего (первая декада декабря) осенняя гомотермия наступает в районе м. Ажи – пос. Яйлю. В целом по озеру время от момента установления гомотермии на мелководных участках озера до окончательного завершения этого процесса по всему озеру составляет около месяца. Камгинский и Кыгинский заливы имеют почти одинаковые сроки

наступления гомотермии. Очевидно, это связано с тем, что заливы защищены от ветро-волновых процессов.

К концу ноября озеро почти полностью охлаждается до температуры ниже  $T_{md}$ . Остается лишь небольшая по площади область относительно теплой воды в районе м. Ажи – пос. Яйлю, простирающаяся до глубины 150 м и имеющая температуру выше  $T_{md}$ . Такая картина повторяется почти ежегодно.

*Период зимнего минимума.* Зимнее охлаждение озера начинается с момента установления по всему озеру осенней гомотермии и продолжается в состоянии обратной стратификации почти четыре месяца, с первых чисел декабря до первой декады апреля. Конвективные процессы в это время прекращаются, а теплоотдача происходит в условиях ветрового перемешивания. Верхние слои озера теряют больше тепла, чем нижележащие, обратная термическая стратификация по мере усиления этого процесса становится все более и более ярко выраженной. После охлаждения поверхности воды до  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  возможность образования ледового покрова зависит только от скорости ветра. При штилевой погоде достаточно быстро формируется ледовый покров, но он может быть вновь разрушен верховками или низовками. Зимний минимум температуры воды подо льдом наступает в конце февраля - первой декаде марта. Температура воды подо льдом составляет  $0,1\text{--}0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на глубине 100 м она увеличивается до  $0,8\text{--}1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  и у дна значения температуры оказываются близкими к  $1,8\text{--}2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В период зимнего минимума может происходить полное замерзание озера, если только ветровое волнение не приводит к разрушению льда.

Впечатляющие результаты экспериментальных исследований и построения, на основе данных измерений высокого пространственно-временного разрешения, феноменологических моделей (или схем) сезонной эволюции механизмов циркуляции и характеристик термического режима глубоких межгорных озер Камлупс и Коотеней (Британская Колумбия, Канада), представлены в работах [97–99, 141]. Озера Камлупс и Коотеней по многим физико-географическим и термодинамическим характеристикам можно считать аналогами Телецкого озера. В цитированных публикациях подробно описана организация и результаты проведения с мая 1974 по май 1975 года экспедиционных работ на озере Камлупс (длина водоема – 25 км, средняя ширина 2,1 км, максимальная глубина – 145 м). Основу наблюдательной сети экспедиционных работ составляли 24 автоматические станции вертикального зондирования температуры и мутности воды (временные интервалы наблюдений – 20 мин, среднее расстояние между станциями вдоль озера – около 2,3 км). Данные этих станций весной и осенью дополнялись наблюдениями с девяти заякоренных буев, установленных на склоне котловины озера, примыкающем к устью реки Томпсон – главному притоку озера Камлупс (длина склона около 600 м, временные интервалы наблюдений – 10 минут, среднее расстояние между буями – 50 м). На рис. 1.2 показаны профили глубин на предустьевых склонах Телецкого озера и озера Камлупс и

места расположения дополнительных станций зондирования температуры и мутности озера Камлупс [97].

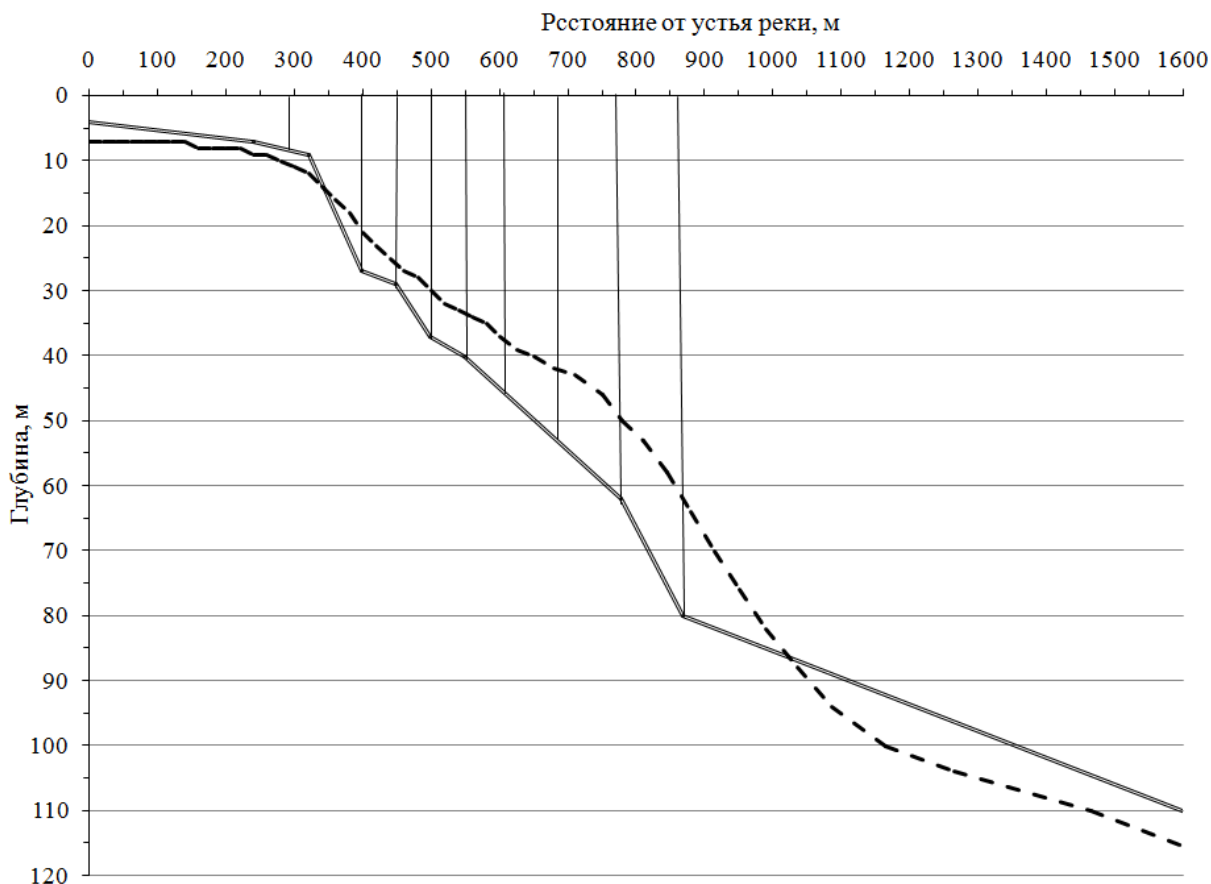


Рисунок 1.2 – Профили глубин Телецкого озера (южная оконечность, примыкающая к устью р. Чулышман – пунктирная линия) и озера Камлупс (южная оконечность, примыкающая к устью р. Томпсон – сплошная линия). Вертикальные сплошные линии указывают на места расположения дополнительных станций вертикального зондирования температуры и мутности воды как часть сети измерительной системы на озере Камлупс [97]

Феноменологические модели Селегея [64] и Кармака [97–99] во многом идентичны относительно обобщенных характеристик термического режима и доминантных механизмов и типов циркуляции озера в периоды летнего нагревания, осеннего охлаждения и в зимний период. Однако существенные различия этих концептуальных моделей фиксируются для периода весеннего нагревания при анализе различных типов циркуляции, индуцируемых проникновением в озеро речных вод основного притока (река Томпсон в озере Камлупс, реки Коотеней и Дункан в озере Коотеней и река Чулышман в Телецком озере). Период весеннего нагревания в феноменологической модели Кармака (см. рис. 11, [98]) делится на три фазы: F – «ранняя весна», когда прогреваемые до  $4^{\circ}\text{C}$  речные воды основного притока опускаются ко дну озера вдоль склона котловины водоема, примыкающего к устью реки (см. рис. 9а, [98]), образуя плотностную склоновую струю; G – «середина весны», когда дальнейшее нагревание речных вод выше  $4^{\circ}\text{C}$  приводит к формированию речного термического бара [97] вблизи границы «озеро–река» с

продолжающимся опусканием «тяжелой» смеси речной и озерной воды ко дну водоема вдоль приустьевых склона (см. рис. 9б, [98]); Н – «поздняя весна», когда температура верхних слоев озера за счет адвекции речных вод и поверхностного теплообмена достигает значений равных или выше  $4^{\circ}\text{C}$ , каббелинг (процесс уплотнения при смешении), поддерживающий речной термический бар [7, 98, 113], прекращается, а теплая речная вода вблизи устья реки деблокируется и начинает распространяться в поверхностных слоях озера, приводя к формированию первичного термоклина (см. рис. 9с, [98]). Примечательно, что продольные температурные разрезы на рис. 50б (5-6 июня 1968 года, участок V) из работы [64] и на рис. 9с в статье [98] оказываются качественно подобными (фаза «поздняя весна»).

Для лучшего понимания терминов «плотностная склоновая струя» и «речной термический бар» на рис. 1.3 воспроизведена гипотетическая схема (далее – схема Кармака) последовательности четырех типов циркуляции, обусловленных проникновением в глубокое озеро быстро прогреваемых в весенний период речных вод [97]. При этом температура воды озера считается величиной постоянной и равной  $2^{\circ}\text{C}$ , а поступающая речная вода быстро прогревается от  $0$  до  $8^{\circ}\text{C}$ . В этой схеме были проигнорированы эффекты поверхностного теплообмена, усложняющие термическую структуру открытого озера.

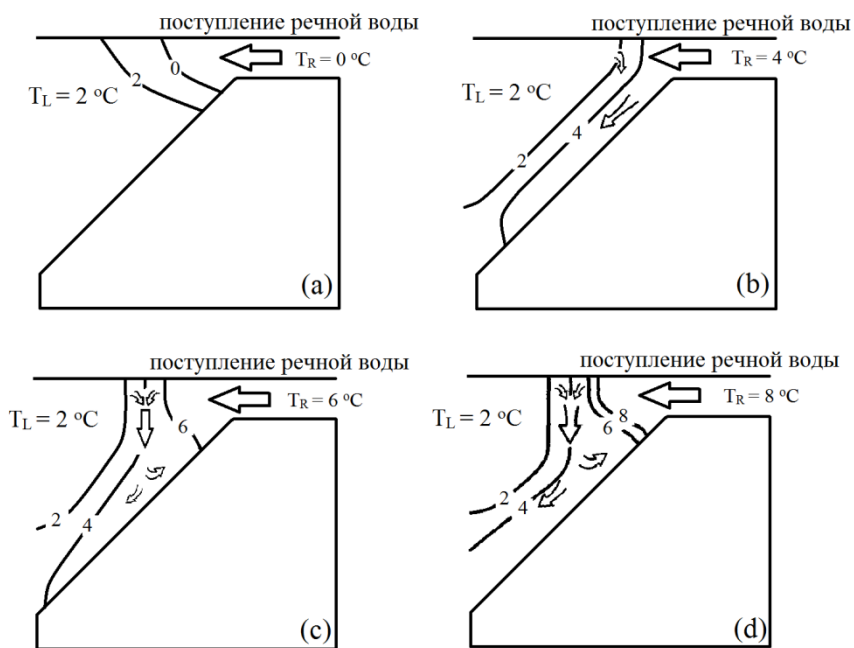


Рисунок 1.3 – Гипотетическая схема проникновения быстро прогреваемых весной речных вод в глубокое межгорное озеро [97]

При температуре  $0^{\circ}\text{C}$  речная вода имеет плотность меньшую, чем плотность воды в озере, поэтому речная вода, поступающая в водоем, распространяется в поверхностном слое водоема (см. рис. 1.3а). Когда речная вода прогревается от  $2$  до  $4^{\circ}\text{C}$ , то по мере поступления в озеро, она опускается вниз вдоль приустьевых склона, образуя плотностную склоновую струю (см. рис. 1.3б,

который соответствует фазе F работы [98]). При дальнейшем прогревании плотность речной воды уменьшается и при  $6^{\circ}\text{C}$  ее плотность становится почти равной плотности воды озера. В такой ситуации формируется зона каббелинг – неустойчивости [98, 113], в которой общая смесь речной и озерной воды оказывается более плотной, чем любая из её компонентов. При разрешении каббелинг-неустойчивости формируется речной термический бар (см. рис. 1.3с, который соответствует фазе G работы [98]).

Наконец, следуя работе [97], рассмотрим взаимодействие речной воды с температурой  $8^{\circ}\text{C}$  и озерной воды с температурой  $2^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 1.3d). До момента какого-либо перемешивания вода притока имеет меньшую плотность, чем озерная вода. Таким образом, речная вода первоначально проникает в озеро как поток распластанный по поверхности. Смесь вод в диапазоне температур от  $6$  до  $8^{\circ}\text{C}$  оказывается легче, чем озерная вода, в результате чего эта смесь остается на поверхности озера. Таким образом, на этой стадии (рис. 1.3d) реализуются два различных процесса. Первый из них связан с поступлением речной воды при температуре  $6\text{--}8^{\circ}\text{C}$  и представляет собой процесс, происходящий в условиях статической устойчивости, который сдерживает вертикальное перемешивание. Второй процесс в диапазоне температур  $2\text{--}6^{\circ}\text{C}$  – это процесс, происходящий в условиях каббелинг-неустойчивости, который усиливает вертикальное перемешивание на фронте речного термического бара.

Причина отсутствия описания фаз F и G [98] периода весеннего нагревания в феноменологической модели Селегея на участке V (см. рис. 1.1), как нам представляется, достаточно проста. Основные термодинамические события фаз F (плотностная склоновая струя) и G (речной термический бар, запирающий приток речной воды в озеро) «разыгрываются», согласно феноменологической модели Кармака [97, 98], над крутым склоном котловины, примыкающим к дельте реки Томпсон на участке длиной менее 1 км (см. наш рис. 1.2 и рис. 6 из цитируемой статьи [97]). То же самое, судя по рис. 1.2, должно быть справедливо для южной оконечности Телецкого озера. Однако ближайший озерный гидрологический разрез, на котором фиксируются вертикальные профили температуры воды (м. Кырсай, см. рис. 1.1) располагается на расстоянии 2,6 км от устья Чулышмана. Таким образом, отсутствие фаз F и G в феноменологической схеме Селегея связано с отсутствием пунктов наблюдений «в нужном месте и в нужное время».

### **1.3 Обзор работ по численному моделированию гидротермодинамического режима Телецкого озера и некоторых озер-аналогов**

В Институте водных и экологических проблем СО РАН, начиная с 1989 г., реализуется комплексная программа, включающая гидрофизические, гидрохимические, гидробиологические и палеолимнологические исследования Телецкого озера. Цель исследований – установление

направления и скорости сукцессии экосистемы Телецкого озера во внутригодовом и многолетнем аспектах как результата взаимодействия физических, химических и биологических процессов, природных и антропогенных факторов [8, 10, 21, 26, 38–40, 45, 46, 50, 61 и др.].

Что касается работ по численному моделированию гидротермодинамического режима Телецкого озера, то сотрудниками ИВЭП СО РАН с помощью одномерных вертикальных моделей на основе данных экспедиционных работ исследовался термический и ледовый режимы озера [27–29]. Первая успешная попытка разработки и верификации нестационарной двумерной поперечно-осредненной (т.е. продольно-вертикальной) численной модели сезонных изменений термического режима Телецкого озера в весенний и летний периоды описана в публикациях [33, 34, 135, 136]. Результаты развития исследований данного направления представлены в работах [35–37; 91]. Особый интерес представляют работы [35, 36], в которых описаны результаты численного моделирования гидротермических процессов Телецкого озера в годовом цикле и в предустьевой зоне меридиональной части озера, соответственно. В этих работах Кыгинский и Камгинский заливы не рассматриваются, а гидрологические характеристики (расход и температура воды) р. Чулышман учитываются при задании краевых условий на входной вертикальной границе «река–озеро». Делается это, в частности, путем задания гипотетических значений скорости втекающей в озеро воды. В численных моделях [35, 36] используется равномерная сетка вдоль продольной оси озера с общим числом расчетных ячеек – 40, длины которых составляли 1925 м. Следует отметить, что такая расчетная сетка имеет грубое разрешение и, соответственно, большие ошибки аппроксимации глубин на приустьевом склоне особенно в дельте р. Чулышман, где задаются граничные условия численных моделей. Сказанное подтверждается рис. 1.4.

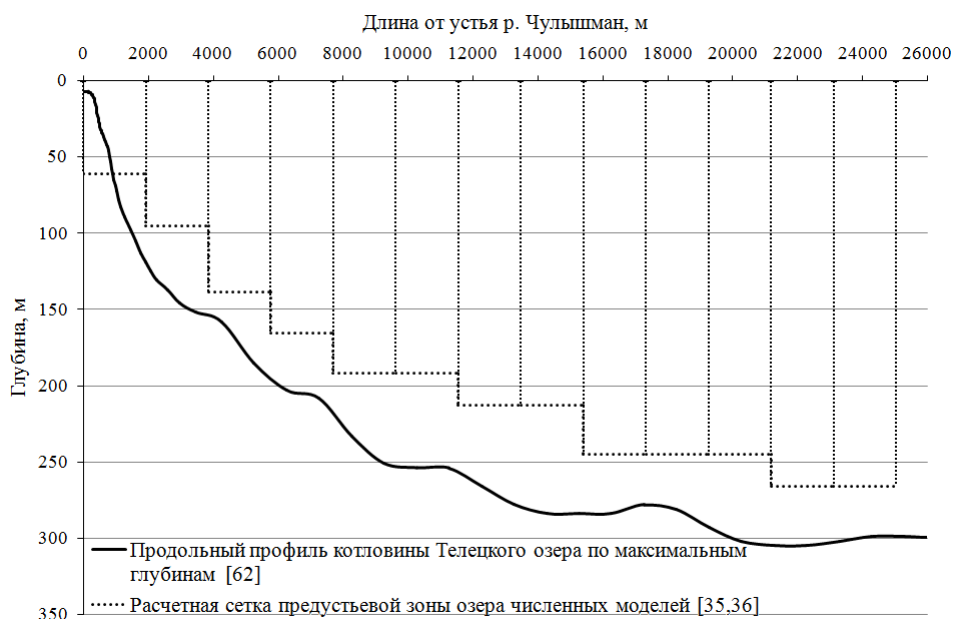


Рисунок 1.4 – Сравнение продольного профиля глубин части котловины Телецкого озера, примыкающей к устью р. Чулышман [62] и расчетной сетки предустьевой зоны озера численных моделей [35, 36]

При численной реализации рассматриваемых моделей всего озера [35] и его приустьевой части [36] использовались идентичные входные данные. Расчеты были проведены только для среднемесячных значений параметров метеорологических внешних воздействий на поверхности водоема и среднемесячных величин температуры воды ( $6,6^{\circ}\text{C}$  в мае и  $11,9^{\circ}\text{C}$  в июне) и расхода ( $574\text{ м}^3/\text{с}$  в мае и  $272\text{ м}^3/\text{с}$  в июне) реки Чулышман, полученных в результате осреднения данных наблюдений на г/п Балыкча за 1968 г. Начальная температура воды в озере была задана постоянной и равной  $2,3^{\circ}\text{C}$ . Расчеты начинались с 20 мая 1968 г., когда фактическая температура воды в устье реки Чулышман достигла  $5,5^{\circ}\text{C}$  и, таким образом, стадия F и первая часть стадии G феноменологической модели [98] в работах [35, 36] не воспроизводились вообще.

Таким образом, представленный выше краткий обзор свидетельствует о том, что приоритет в разработке нестационарных двумерных поперечно-осредненных численных моделей гидротермических процессов в Телецком озере принадлежит ИВЭП СО РАН, благодаря работам О.Ф. Васильева, В.И. Квона и соавторов [35, 36, 135, 136 и др.]. Вместе с тем, очевидна необходимость дальнейшего изучения гидротермодинамического режима Телецкого озера. В первую очередь это связано с необходимостью исследований динамики проникновения вод реки Чулышман в меридиональную часть Телецкого озера в период весеннего половодья. Как отмечалось выше в моделях [35, 36, 135, 136 и др.] для южной части Телецкого озера не воспроизводятся характерные особенности циркуляции фаз F (плотностная склоновая струя) и G (речной термический бар, запирающий приток речной воды в озеро), описанные в феноменологической модели Кармака [98]. Следует отметить, что вопрос о физическом понимании процессов формирования, перемещения и слияния термических баров Телецкого озера (речной и классический озерный термобары, локальные термобары в Кыгинском и Камгинском заливе) остается по существу открытым, как в экспериментальном, так и теоретическом отношениях и требует дальнейших исследований. Особенно много неясностей связано с выяснением влияния короткопериодной изменчивости параметров внешних метеорологических и гидрологических факторов на формирование и развитие термических баров озера.

Проблемы и результаты численного моделирования весенних термических баров в глубоких озерах, на примере озера Камлупс и озера Байкал (Телецкое озеро, согласно [62, 64], часто называют «Малым Байкалом»), обсуждаются в работах [3, 4, 32, 79–82, 84, 116, 117, 133 и др.]. Динамика речного термического бара, обусловленного весенним нагреванием вод р. Селенга, основного притока озера Байкал, в статье [117] изучается с использованием двумерной продольно-вертикальной численной модели озера, но, в отличие от работ [35, 36], без поперечного осреднения уравнений термодинамики водоема. В этой работе используется сильно упрощенная модель геометрии котловины Байкала (прямоугольник с длиной  $L = 6$  км и глубиной  $H = 1$  км).

Расход воды во входном створе (краевое условие на границе озеро – дельта Селенги с глубиной 50 м) задается постоянным и равным  $5000 \text{ м}^3/\text{с}$ . Данные наблюдений за температурой воды в дельте Селенги не используются, а значения температуры воды реки Селенги на входном створе определяются с помощью одномерного по глубине уравнения теплопроводности при заданных значениях потока тепла на поверхности раздела вода–воздух. Первую попытку построения численной модели речного термического бара озера Камлупс, описанную в работе [116], согласно мнению авторов, можно считать успешной. Однако основные упрощающие предположения, сделанные при построении модели весеннего речного термического бара озера Байкал [117], в частности, касающиеся очень грубой аппроксимации геометрии котловины водоема и сильно упрощенного варианта задания скорости течения на границе «река–озеро», в модели озера Камлупс [116] сохраняются.

По солидарному мнению авторов [117] и [36], основная трудность при моделировании устьевых областей глубоких водоемов заключается в математической и интерпретационной неопределенностях в постановке краевых условий для скорости течения и температуры воды на открытой границе река-озеро. Конструктивный способ преодоления этой трудности, по мнению авторов статьи [117], состоит в построении более совершенных моделей, которые объединяют реку и озеро в единый объект численного моделирования. Именно такой подход был реализован в НИР при разработке информационно-вычислительного комплекса «Телецкое озеро».



## **2 Информационно-вычислительный комплекс гидродинамики и термического режима Телецкого озера**

### **2.1 Модульная структура и функциональные возможности ИВК «Телецкое озеро»**

Как уже отмечалось во введении, информационно-вычислительный комплекс, разработанный для численного воспроизведения переменных гидродинамики и термического режима Телецкого озера, с расчетом соответствующих переменных устьевого участка реки Чулышман, содержит четыре модуля: 1) модуль генерации модели сетки - WMS; 2) базовый прогностический модуль ИВК – модель CE-QUAL-W2; 3) модуль пре- и постпроцессорной обработки входной и выходной информации - W2i и AGPM-2D; 4) БД для обеспечения работы модулей 1 – 3.

Прогностическим модулем ИВК «Телецкое озеро» является версия 3.5 численной модели гидродинамики и качества воды CE-QUAL-W2 (далее W2) [105; 139]. Мотивация выбора данного программного продукта в качестве базового компонента ИВК включает в себя следующие позиции:

1) разработка последовательности версий модели W2, начиная с 1974 года, проводится непрерывно с учетом результатов практических применений консорциумом мировых лидеров-производителей данного класса программных продуктов в составе: Станция водных путей инженерного корпуса армии США [134], группа моделирования качества воды Портлендского государственного университета [139] и группа моделирования поверхностных вод международной компании ERM (управление ресурсами окружающей среды) [112];

2) для программного продукта W2 характерны очень высокие темпы роста масштабов успешных практических применений. Так согласно обобщенным данным [139] в настоящее время с использованием W2 в 116 странах мира промоделировано 1134 конкретных водных объектов (436 рек, 297 озер, 319 водохранилищ и 82 эстуария). Указанные показатели за период с 2004 по 2012 год выросли почти в три раза;

3) программный код последних версий модели W2 вместе с руководством пользователя и техническими отчетами о профессиональном применении W2 к различным водным объектам на территории США свободно доступны в Интернете [139];

4) руководства пользователя W2, подготовленные доктором Т. Коли (Инженерный корпус армии США) и профессором С. Веллсом (Портлендский государственный университет, США), являются отличным учебным пособием для начинающих пользователей и очень полезным и информативным инструментом в руках уже более опытных пользователей [104, 105]. Специально для начинающих пользователей профессор С. Веллс подготовил хорошо иллюстрированное и

достаточно подробное описание основных этапов практического применения W2, которое можно найти на веб-сайте [101]. Благодаря усилиям и энтузиазму сотрудников Портлендского университета во главе с доктором К. Бергером эффективно работает «Форум пользователей» [100], обеспечивающий поддержку, которая может быть получена как со стороны разработчиков, так и других пользователей W2. Для повышения квалификации пользователей W2 организации – разработчики проводят ежегодные учебные семинары;

5) сроки реализации проектов, основанных на применении W2 к конкретным водным объектам, существенно сокращаются, а исследовательский потенциал пользователей резко возрастает благодаря появившейся в последние годы возможности использования лицензионных программных продуктов WMS [95] и W2i-AGPM for W2 [122] в качестве пре- и постпроцессоров численной модели W2;

6) в случае необходимости преодоления пользователем ограничений, связанных с двумерностью модели W2, он с помощью мультимодульной системы GEMSS [112] может без особых затруднений перейти к использованию трехмерной численной модели GLLVHT, программный код которой разработали Дж.Е. Эдингер и Е.М. Бучак в 1980 году на основе конечно-разностных аппроксимаций, численных методов решения и файловой структуры, ранее примененных ими при разработке численной модели W2 [109, 110].

Несмотря на все вышеуказанное, при практическом применении программного продукта W2 возникают значительные сложности. Первая из них – высокие требования к уровню знаний «идеального» пользователя в следующих научных дисциплинах: геофизическая гидродинамика, гидрология/лимнология, метеорология, гидрохимия/качество воды, гидробиология/водные экосистемы, вычислительная математика/программирование на Фортране (если Вы хотите изменить исходный код), статистическая обработка данных, ведение и реконструкция баз данных [104, 105, 125]. Моделирование переменных гидродинамики и качества воды во многом, согласно [105], является искусством, требующим как обладания знаниями в указанных дисциплинах, так и опыта интегрирования этих знаний. Автор публикации [125] отмечает, что наилучшие результаты применения W2 получает действующая совместно (синергетическая) команда, члены которой имеют знания и практический опыт работы в указанных выше областях. Здесь также уместна цитата из главы 1 руководства пользователя W2 [104] «...предупреждение начинающему пользователю: применение модели является сложной и отнимающей очень много времени задачей». Очевидно, что ответственное и результативное применение W2 требует целевой междисциплинарной подготовки пользователей данного программного продукта. Вторая – высокие требования к пространственно-временному разрешению, составу и точности данных морфометрии, а также метеорологических, гидрологических, гидрохимических и гидробиологических наблюдений, которые необходимы для калибровки и верификации моделей

W2. Эти требования вполне отражают известный принцип «хорошие модели требуют хороших данных» [53, 104, 123].

Инициатива начала работ по освоению численной модели W2 в лаборатории математических проблем экологии и природопользования организованного в 2002 году Югорского НИИ информационных технологий (г. Ханты-Мансийск), как описано в [55], исходила от член.-корр. РАН В.Н. Лыкосова (Институт вычислительной математики РАН, г. Москва), который совместно с группой экспертов рекомендовал опробовать модель W2 как инструмент решения прикладных задач по оценке и прогнозу экологического состояния водных объектов на территории существующих и перспективных зон промышленного развития севера Западной Сибири. При разработке ИВК «Телецкое озеро» использовался накопленный автором опыт применения модели W2 к участку среднего течения реки Северная Сосьва [54, 55, 59].

### 2.1.1 Исходные уравнения, краевые и начальные условия, численная реализация, файловая структура, возможности и ограничения модели гидродинамики и качества воды CE-QUAL-W2

Система базовых уравнений модели W2 v.3.5 имеет следующий вид [105]:

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = gB \sin \alpha + g \cos \alpha B \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g \cos \alpha B}{\rho} \int_{\eta}^z \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_x}{\partial x} + \quad (1)$$

$$+ \frac{1}{\rho} \frac{\partial B \tau_z}{\partial z} + q B U_x, \\ 0 = g \cos \alpha - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = q B, \quad (3)$$

$$\rho = f(T, \Phi_{TDS}, \Phi_{ISS}), \quad (4)$$

$$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h U B dz - \int_{\eta}^h q B dz, \quad (5)$$

где  $t$  – время;  $x$  – продольная координата;  $z$  – глубина озера;  $U$  и  $W$  – компоненты скорости вдоль осей  $x$  и  $z$ , соответственно;  $B$  – ширина русла реки или котловины озера;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $P$  – давление;  $\tau_x$  – поперечно осредненное касательное напряжение вдоль оси  $x$ ;  $\tau_z$  – поперечно осредненное касательное напряжение вдоль оси  $z$ ;  $\rho$  – плотность;  $\eta$  – уровень поверхности воды;  $q$  – распределение по  $x$  и  $z$  результирующих расходов воды боковых притоков;

$f(T, \Phi_{TDS}, \Phi_{ISS})$  – функция зависимости плотности от температуры воды ( $T$ ), солености или суммарной концентрации растворенных в воде веществ ( $\Phi_{TDS}$ ), и концентрации неорганических взвешенных веществ ( $\Phi_{ISS}$ );  $\alpha$  – угол уклона русла реки (для котловины озера  $\alpha = 0$ ).

Уравнение для описания динамики полей температуры и показателей качества воды модели W2 имеет вид:

$$\frac{\partial B\Phi}{\partial t} + \frac{\partial UB\Phi}{\partial x} + \frac{\partial WB\Phi}{\partial z} - \frac{\partial(BD_x \frac{\partial \Phi}{\partial x})}{\partial x} - \frac{\partial(BD_z \frac{\partial \Phi}{\partial z})}{\partial z} = q_\Phi B + S_\Phi B, \quad (6)$$

где  $\Phi$  – поперечно осредненные значения температуры или концентраций показателей качества воды;  $D_x$  и  $D_z$  – коэффициенты продольной и вертикальной дисперсии для  $\Phi$ ;  $q_\Phi$  – расходы боковых притоков или оттоков  $\Phi$ ;  $S_\Phi$  – слагаемое поперечно-осредненного источника / стока  $\Phi$ .

При применении уравнений (1) – (6) для описания рек используется локальная ортогональная система координат ( $x, z$ ), где ось  $x$  направлена вдоль уклонов русла отдельных участков реки, определяемых на основе анализа тальвега (см. рис. 2.1).

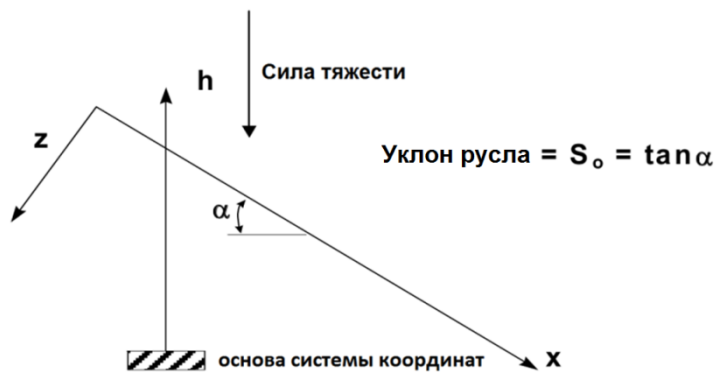


Рисунок 2.1 – Схема задания уклона русла реки

Уклон русла используется для расчета действия силы тяжести в русле реки. Описание метода декомпозиции русла устьевое участка реки Чулышман на отдельные водотоки для определения соответствующих значений  $\alpha$  приведено в разделе 2.2, данной главы. При применении (1) – (6) для описания физических, химических и биологических процессов озер и водохранилищ используется декартова система координат, с  $\alpha = 0$ .

Начальные и граничные условия для системы уравнений (1) – (6) задаются, согласно [105], на основе данных наблюдений либо иным способом – в зависимости от конкретных целей применения модели W2.

В начальный момент времени задаются распределения температуры и концентрации показателей качества воды, толщины льда, уровни водной поверхности. На входной вертикальной границе области моделирования задаются расход либо уровень воды, температура и концентрации показателей качества втекающей воды. На выходной границе задается расход либо уровень воды.

Влияние боковых притоков в модели W2, согласно [105], учитывается путем задания их расходов, температур и показателей качества воды.

На границе раздела «вода–воздух» задаются граничные условия, описывающие поверхностный теплообмен и напряжение ветра. Напряжение ветра и теплообмен через водную поверхность вычисляются с использованием метеорологических данных: температура воздуха, температура точки росы, скорость и направление ветра, балл облачности.

Поверхностный теплообмен в модели W2 рассчитывается посредством двух методов: первый основан на расчете составляющих радиационного и теплового балансов на поверхности раздела «вода – воздух», второй – на расчете, так называемой, равновесной температуры [105, Р. 234]. Поверхностный теплообмен, рассчитываемый на основе уравнения баланса тепла, согласно [105] является теоретически более обоснованным и выражается уравнением (А-203) в [105]:

$$H_n = H_s + H_a + H_e + H_c - (H_{sr} + H_{ar} + H_{br}), \quad (7)$$

где  $H_n$  – результирующая скорость теплообмена через поверхность воды;  $H_s$  – приходящая коротковолновая (КВ) солнечная радиация;  $H_a$  – приходящая атмосферная длинноволновая (ДВ) радиация;  $H_e$  – скрытые потери тепла обусловленные испарением;  $H_c$  – теплопроводность (явный турбулентный теплообмен);  $H_{sr}$  – отраженная КВ солнечная радиация;  $H_{ar}$  – отраженная ДВ радиация;  $H_{br}$  – уходящая ДВ радиация от поверхности воды.

Для нахождения решения уравнения (7) используются формулы (А-204) – (А-207) из [105]:

$$H_{br} = \varepsilon \sigma^* (T_s + 273.15)^4, \quad (8)$$

$$H_e = f(W) (e_s - e_a), \quad (9)$$

$$H_c = C_c f(W) (T_s - T_a), \quad (10)$$

$$H_s(z) = (1 - \beta) H_s e^{-\eta z}, \quad (11)$$

где  $\varepsilon$  – излучательная способность воды, равная 0.97;  $\sigma^*$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $T_s$  – температура поверхности воды;  $f(W)$  – функция зависимости испарения от скорости ветра (в модели W2 имеется несколько различных формулировок для расчета  $f(W)$ );  $e_s$  – насыщающее давление пара на поверхности воды;  $e_a$  – давление водяного пара;  $C_c$  – коэффициент Боуэна;  $T_a$  – температура воздуха;  $H_s(z)$  – коротковолновая радиация на глубине  $z$ ;  $\beta$  – доля радиации, поглощенной на поверхности воды;  $\eta$  – коэффициент экстинкции (ослабления).

Касательное напряжение на поверхности воды, согласно [105] (формула (А-142)), определяется как:

$$\tau_s = C_D \rho_a W_h^2, \quad (12)$$

где  $\tau_s$  – касательное напряжение на поверхности воды;  $\rho_a$  – плотность воздуха;  $W_h$  – скорость ветра, измеренная на высоте  $h$ ;  $C_D$  – коэффициент сопротивления ветра ( $C_D = 0$ , при  $W_h < 1$  м/с;  $C_D = 0,0005 W_h^{0.5}$  при  $1 \leq W_h \leq 15$  м/с;  $C_D = 0,0026$  при  $W_h \geq 15$  м/с).

На дне водоема рассчитываются касательное напряжение вблизи дна ( $\tau_b$ ) и седиментный теплообмен. Касательное напряжение на дне выражается уравнением (А-147) из [105]:

$$\tau_b = \frac{\rho_w g}{C^2} U|U|, \quad (13)$$

где  $\rho_w$  – плотность воды;  $C$  – коэффициент трения Шези. Последний связан с коэффициентом трения Маннинга ( $n$ ) соотношением (А-148) из [104]:

$$C = (1/n)R^{1/6}, \quad (14)$$

где  $R$  – гидравлический радиус.

Седиментный теплообмен на границе раздела «седименты-вода» описывается соотношением (А-214) [105], которое имеет вид:

$$H_{sw} = -K_{sw}(T_w - T_{sed}), \quad (15)$$

где:  $H_{sw}$  – скорость теплообмена на границе раздела «седименты-вода»;  $K_{sw}$  – коэффициент теплообмена на границе раздела «седименты-вода»;  $T_w$  – температура воды;  $T_{sed}$  – температура седиментов.

Вертикальное напряжение сдвига ( $\tau_z$ ) в модели W2 описывается формулой (А-149) из [105]:

$$\frac{\tau_z}{\rho} = A_z \frac{\partial U}{\partial z}, \quad (16)$$

где  $A_z$  – коэффициент вертикальной турбулентной вязкости.

Достоинством модели W2 является представление пользователю широкого выбора подмоделей для расчета коэффициента  $A_z$ . Так версия 3.5 модели W2 дает пользователю возможность выбора одной из шести подмоделей расчета  $A_z$  (см. табл. А-2 в [105]). Наиболее современной, сложной и вычислительно затратной из имеющихся в модели W2 подмоделей расчета  $A_z$  является подмодель ТКЕ, которая представляет собой вариант известной  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности, разработанный и реализованный С. Веллсом [105]. Подмодель ТКЕ, в отличие от других вертикально одномерных подмоделей, является двумерной, что позволяет учесть как вертикальный перенос кинетической энергии ( $k$ ) и скорости её диссипации ( $\varepsilon$ ), так и горизонтальный перенос этих переменных за счет адвекции. Именно эта подмодель по результатам верификации и анализа чувствительности была выбрана базовой в программе численного экспериментирования с ИВК «Телецкое озеро». Уравнения подмодели ТКЕ ((А-173) и (А-174) в [105]) имеют следующий вид:

$$\frac{\partial k B}{\partial t} + \frac{\partial k B U}{\partial x} + \frac{\partial k B W}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left( B \frac{A_z}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( B \frac{A_z}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) = B(P + G - \varepsilon + P_k), \quad (17)$$

$$\frac{\partial \varepsilon B}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon B U}{\partial x} + \frac{\partial \varepsilon B W}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left( B \frac{A_z}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( B \frac{A_z}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) = B(C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P + C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + P_\varepsilon), \quad (18)$$

где

$$A_z = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; P = A_z \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right)^2 \right]; G = - \frac{A_z}{\sigma_t} N^2; P_k = \frac{C_f U^3}{(0.5B)}; P_\varepsilon = \frac{10 C_f^{1.25} U^4}{(0.5B)^2}; C_f = \frac{g}{C^2} = \frac{g n^2}{R^{1/3}};$$

$\sigma_k = 1.0$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ ;  $C_\mu = 0.09$ ;  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ; турбулентное число Прандтля/Шмидта –  $\sigma_t = 1.0$ .

Продольное напряжение сдвига ( $\tau_x$ ), согласно формуле (A-172) [105], определяется как:

$$\frac{\tau_x}{\rho} = A_x \frac{\partial U}{\partial x}, \quad (19)$$

где:  $A_x$  – коэффициент продольной вихревой вязкости. В модели W2  $A_x$  – константа, определяемая пользователем.

Согласно [105], в модели W2 реализованы два варианта модели динамики ледового покрова: простой и детальный. Детальный алгоритм расчета образования и таяния льда позволяет учитывать теплообмен на границах разделов «лед-воздух» и «лед-вода», а также теплопроводность через слой льда. Этот алгоритм состоит из серии одномерных, квазистационарных, термодинамических расчетов на каждом шаге по времени и подробно описан в Приложении А работы [105].

Система уравнений (1) – (6) вместе с соответствующими начальными и граничными условиями реализована с применением трех различных численных схем: схема направленных разностей UPWIND, схема повышенного порядка точности QUICKEST и схема ULTIMATE (схема QUICKEST с алгоритмом Леонарда) [105]. Схема направленных разностей приводит к счетной диффузии (вязкости), часто большей, чем физическая диффузия. Схема третьего порядка точности QUICKEST уменьшает численную диффузию, но в областях высоких градиентов она генерирует «выбросы вверх или вниз», в результате чего могут возникнуть малые отрицательные концентрации переменных качества воды. Решение, полученное с помощью схемы ULTIMATE, свободно от указанного недостатка [105].

Численный аналог гидродинамического блока модели W2 позволяет проводить с высоким пространственно-временным разрешением расчеты уровня поверхности воды, продольной и вертикальной составляющих скорости течения, температуры и толщины льда водных объектов. Из-за использования предположения о поперечной однородности [105] наилучшими объектами применения модели являются относительно вытянутые и узкие водные объекты, характеризующиеся существенными продольными и вертикальными градиентами искомых переменных. Численная модель W2 позволяет учитывать реальную внутрисуточную динамику метеорологических параметров (скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, балл облачности, солнечное излучение), а также параметры ветрового и светового затенения, связанного с топографией и растительностью береговой зоны. Версия 3.5 модели W2 позволяет моделировать широкий диапазон экосистемных гидрохимических и гидробиологических процессов, включая эпифитон, фитопланктон, макрофиты и зоопланктон. Блок качества воды модели W2 v. 3.5, модульный по своей структуре, позволяет проводить расчеты 23 основных показателей качества воды (включая процессы эвтрофикации, представленные цепочкой: биогены

→ водоросли → растворенный кислород, органическое вещество, донные отложения, взвеси и т.п.) и более 60 производных от переменных основного состояния. В модели также учитываются: боковая приточность (скорость, температура и характеристики качества воды); техногенные нагрузки от точечных и рассредоточенных источников (сбросов) загрязняющих веществ; процессы на границе раздела вода–седименты и фильтрационный приток/отток подземных вод. Модель позволяет описывать гидротехнические сооружения высокой сложности, такие как: плотины, дамбы, выпускные затворы, водосливы, водопропускные трубопроводы и насосы.

Одним из достоинств модели W2 является возможность описания водоема и впадающей в него реки как единого гидродинамически цельного объекта моделирования за счет использования сплошной расчетной сетки между рекой и водоемом. Последнее на концептуальном уровне проиллюстрировано на рисунке 2.2, заимствованного из отчета [121].

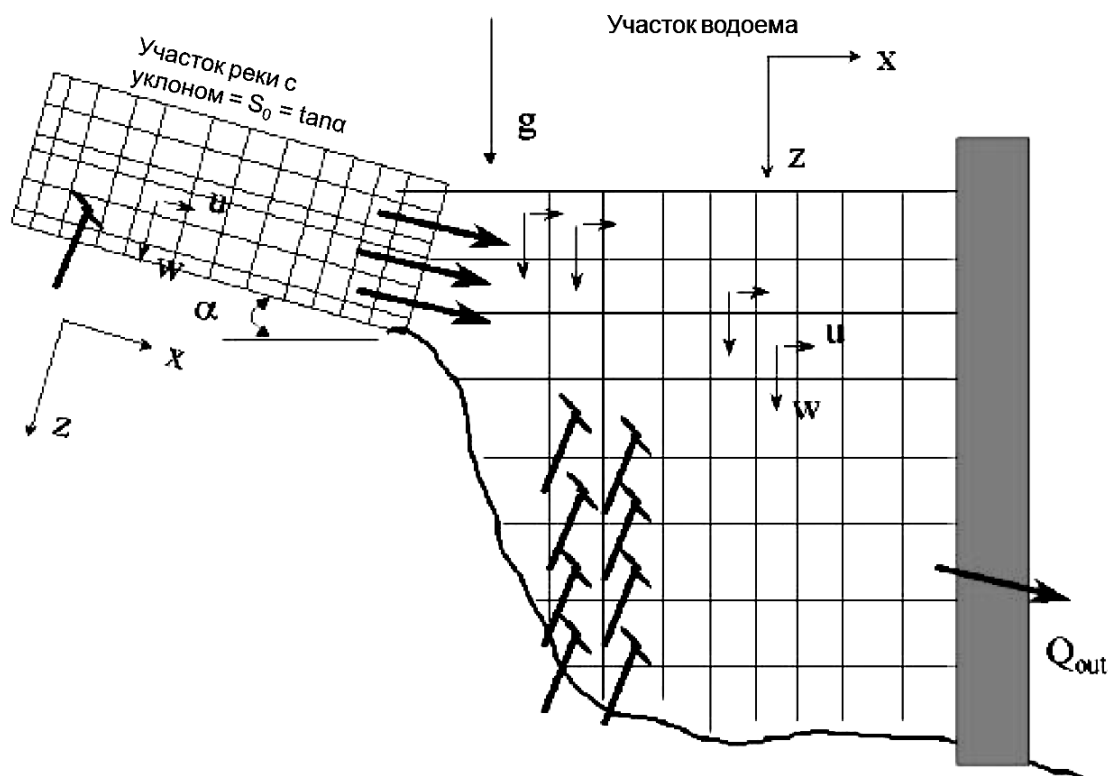


Рисунок 2.2 – Концептуальное схематическое соединение река-водоем в модели W2. Пропеллеры указывают, что ячейки модели являются хорошо перемешанными [121]

Модель W2 имеет открытый исходный Фортран-код и файловую структуру [105]. В связи с этим, применение численной модели W2 для конкретного водного объекта требует квалифицированного заполнения трех основных файлов: контрольный, метеорологический и файл батиметрии. Наиболее сложным из них по структуре и содержанию является контрольный файл или файл управления моделью. Контрольный файл по образному выражению проф. С. Велса, одного из авторов руководств пользователя W2, напоминает «кабину самолета» [101]. Этот файл содержит все средства управления, которые «указывают» численной модели W2, что выбрать в



качестве начальных и граничных условий, какие файлы служат для просмотра результатов, на какой временной период проводится моделирование, какие численные схемы, подмодели и коэффициенты будут использоваться. Метеорологический файл прост по форме и содержит данные о значениях метеорологических величин, полученных с ближайших к водному объекту пунктов наблюдений. Файл батиметрии, на основе которого генерируется сетка численной модели, требует введения следующих видов информации о геометрии расчетной области: 1) длина сегментов, на которые разбиты водотоки и водные объекты; 2) данные о пространственной ориентации сегментов; 3) толщины слоев, которыми аппроксимируются поперечные сечения котловины и береговой зоны водоемов и/или русел и пойм водотоков; 4) ширины слоев, упомянутых выше.

Основные ограничения применения численной модели W2 связаны с тем, что уравнения (1) – (6) являются результатом поперечного осреднения исходных трехмерных уравнений. Боковое осреднение означает пренебрежение поперечной изменчивостью в полях скорости, температуры и концентраций показателей качества воды. Это предположение может быть неприемлемым для водных объектов, включающих в себя значительные боковые вариации в переменных гидродинамики и качества воды. Принимать или нет это предположение зависит от предварительного анализа и оценок пользователя, касающихся батиметрии и структуры прогнозируемых переменных конкретного объекта моделирования. Исходные уравнения модели выписаны в форме законов сохранения с использованием приближения Буссинеска и гидростатики без учета силы Кориолиса и эффектов сжимаемости воды. В силу предположения гидростатики, модель может давать погрешности в ситуациях с большими вертикальными ускорениями. Вопросы, связанные с пренебрежением силой Кориолиса и эффектами сжимаемости, должны быть специально изучены пользователем с учетом особенностей морфометрии объекта моделирования.

В нашем случае из-за значительной протяженности в продольном направлении и относительной малой ширины Телецкого озера (соотношение средней ширины озера к его длине составляет 1:27) основные изменения в сезонной термодинамике этого водоема, согласно [64], происходят в продольно-вертикальном направлении, что в определенной мере оправдывает использование поперечного осреднения исходных уравнений модели W2. Поскольку горизонтальный масштаб длины Телецкое озеро много больше поперечного и вертикального масштабов, то в модели W2, согласно [105, Р. 152], влиянием силы Кориолиса в первом приближении можно пренебречь. Исследование эффектов сжимаемости воды в Телецком озере, проведенное в работе [35], показало, что разница в значениях температуры воды глубинных слоев водоема ( $z > 250$  м), полученная в моделях с учетом и без учета сжимаемости небольшая и не превышает  $0,4^{\circ}\text{C}$ .

### **2.1.2 Модули генерации файла батиметрии и пре- и постпроцессорной обработки входной и выходной информации. База данных для обеспечения работы модулей ИВК**

В ИВК «Телецкое озеро» файл батиметрии численной модели W2 генерируется с помощью системы моделирования бассейна WMS [95], созданной исследовательской лабораторией экологического моделирования университета Брайхема Юнга совместно с Инженерным корпусом армии США. WMS – это снабженная ГИС-интерфейсом совокупность наиболее часто применяемых гидрологических моделей, включая W2. Одно из достоинств WMS, основу которой составляет применение концептуального подхода к моделированию [95, 101], заключается в ее способности проводить усвоение и автоматизированную обработку разнообразной картографической информации, необходимой для создания файлов батиметрии модели W2, включая результаты специализированных полевых работ. Преимущество этого подхода заключается в том, что сгенерированный файл батиметрии для модели W2 позволяет более полно и достоверно учесть реальные особенности морфометрии русла/ложа водного объекта. При необходимости детализации или закругления сеточного разрешения в WMS используется итерационный процесс перераспределения размеров сегментов и слоев, обеспечивающий независимость итоговых результатов моделирования от разрешения сеточной области. Таким образом, WMS в составе ИВК является инструментом пре-процессинговой обработки входных данных для подготовки файла батиметрии W2.

Очень важная роль при проведении численных экспериментов с ИВК отводится контролю состава и качества входной и выходной информации модели W2, а также возможности быстрой и наглядной визуализации результатов моделирования. Быстрое графическое отображение и качественная анимация результатов моделирования имеют принципиальное значение для ускорения этапов калибровки и верификации модели W2. Модуль W2i-AGPM for W2 [122] обеспечивает комплексную пре- и постпроцессорную обработку входной и выходной информации модели W2 и объединяет в себе следующие возможности:

- быстрый анализ входной информации модели W2;
- поиск ошибок и их устранение в файлах модели W2;
- сравнение различий в контрольных файлах W2 между разными вариантами численных экспериментов с моделью;
- создание множества различных типов графических отображений и анимаций для любой моделируемой переменной или их комбинаций (например, возможность анимировать разницу между двумя вариантами расчетов с выделением маркированных зон – объемов воды со специфическими критериями), включая векторные поля течений, вертикальные профили переменных и их временных рядов на заданном местоположении, а также средние значения (по

заданному объему воды) концентраций компонентов качества или температуры воды, наложение полевых данных на кривые графического отображения результатов расчетов (профили, временные ряды) и др.

В соответствии с файловой структурой организации входной информации модели W2 база данных ИВК «Телецкое озеро» имеет следующие тематические блоки: 1 – батиметрия озера и участка реки Чулышман, топография береговой зоны; 2 – метеорология; 3 – гидрология. Блок 1 для обеспечения «информационного покрытия» области моделирования включает в себя два модуля: цифровая батиметрическая карта Телецкого озера [62] и цифровые модели рельефа бассейна Телецкого озера [127, 132]. Гидрометеорологические данные, включенные в блоки 2 и 3 и необходимые для задания начальных и краевых условий, а также для калибровки и верификации численной модели W2, получены с пунктов наблюдений Озерной станции Западно-Сибирского УГМС (см. рис. 1.1). Эти данные также разделены на два модуля. Первый содержит сезонные данные с декадным осреднением за период 1968 – 1972 гг. Второй модуль содержит исходные гидрометеорологические данные за 1968 год. Этот год по рекомендации В.В. Селегея был выбран в качестве основного года для проведения калибровки и верификации переменных гидродинамики и термического режима озера. Именно этот год характеризуется наиболее полным набором доступных данных гидрометеорологических наблюдений Озерной станции Западно-Сибирского УГМС, которые детально проанализированы в [64–67] и частично использовались для верификации моделей [35, 36]. Конкретно, блок 2 БД за 1968 г. содержит 8-срочные метеорологические данные, полученные с м/с Яйлю и Беле (температура и влажность воздуха, температура точка росы, температура на поверхности почвы, давление, облачность, скорость и направление ветра, количество осадков, данные о снежном покрове), а также с гидрологических постов, которые ведут метеорологические наблюдения (температура воды, температура воздуха, скорость и направление ветра, количество осадков, данные о снежном покрове). Блок 3 БД за 1968 год содержит гидрологические данные (уровни, расходы, температура воды, данные о ледовой обстановке), полученные с гидропостов, показанных на рис. 1.1, и данные измерений вертикальных профилей температуры, полученные на рейдовых вертикалях и вертикалях гидрологических разрезов (номера вертикалей и станций обозначены на рис. 1.1).

Для целостного понимания технологического ресурса разработанного информационно-вычислительного комплекса как эффективного инструмента проведения научных исследований и решения прикладных задач, а также как потенциальной вычислительной основы СППР интегрированного управления бассейном и экосистемой водоема [107], на рис. 2.3 приведена схема связи потоков данных в ИВК «Телецкое озеро».

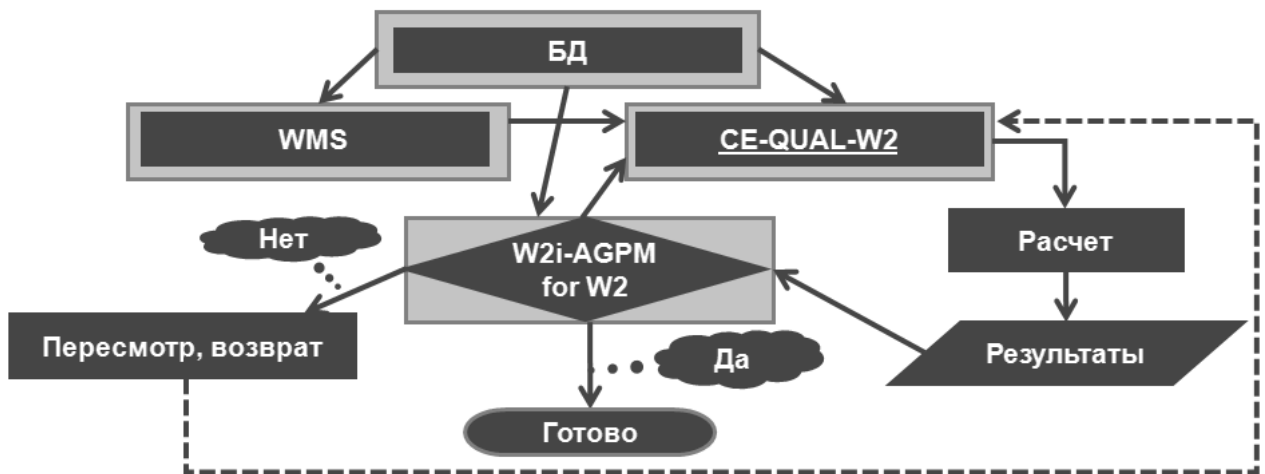


Рисунок 2.3 – Схема связи потоков данных ИВК «Телецкое озеро»

## 2.2 Технология и результаты автоматизированной генерации файла батиметрии Телецкого озера и устьевое участка реки Чулышман

Область моделирования ИВК «Телецкое озеро» включает в себя: 1) участок реки Чулышман от г/п Балыкча до устья реки (длина участка - 9,3 км), 2) устье реки Чулышман, 3) меридиональную и широтную части Телецкого озера, включая Кыгинский и Камгинский заливы, 4) исток реки Бия, 5) устьевые зоны наиболее крупных боковых притоков к озеру (р. Кокши, Большие Чили, Кыга, Камга, Колдор, Самыш), а также береговые или буферные зоны Телецкого озера и участка реки Чулышман.

Система моделирования бассейна WMS [95], описанная в разделе 2.1.2, является в составе ИВК «Телецкое озеро» инструментом пре-процессинговой обработки входных данных для подготовки файла батиметрии Телецкого озера и участка реки Чулышман модели W2 v. 3.5. Ключевой момент при генерации файла батиметрии Телецкого озера и участка реки Чулышман с использованием WMS заключается в необходимости построения нерегулярной триангуляционной сети (TIN) отметок высот над уровнем моря, адекватно описывающей как котловину и береговую зону Телецкого озера, так русло и пойму участка реки Чулышман. Для этого были использованы следующие наборы данных из БД ИВК:

- 1) цифровая батиметрическая карта Телецкого озера при отметке уреза воды 434 мБС [62];
- 2) цифровые модели рельефа, полученные по запросу из цифровой базы данных Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) США, большая часть которых размещена в открытом доступе в Национальном геофизическом информационном центре (NGDC) [127];
- 3) цифровая модель рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission – радарная топографическая миссия Шаттл) [132].

Цифровая батиметрическая карта Телецкого озера была построена по данным экспедиционных работ, проведенных летом 1995-1996 гг. и частично в 1998 г. в рамках Международной программы «CASIMIR» («Сравнительное изучение механизмов осадконакопления в рифтовых озерах») [62]. Указанная карта содержит цифровую модель рельефа котловины озера в диапазоне отметок глубин от среднемноголетнего уровня воды за 1931 – 1999 гг., равного 434 м над уровнем моря, до максимальной глубины, равной 323 м (111 мБС).

Поскольку информация о детальной морфометрической структуре русла реки Чулышман отсутствует, то для построения цифровой модели батиметрии участка русла этой реки была использована база данных NOAA NGDC, содержащая различные цифровые модели рельефа и космоснимки [127]. В качестве базовой информации были выбраны данные высотных отметок с цифровых моделей рельефа, совпадающие с летним меженным периодом, которые с помощью ArcGis 9.3 были представлены в виде цифровой модели участка русла реки Чулышман.

Цифровая модель рельефа SRTM, полученная Национальным картографическим управлением (NIMA) США, с помощью радарной топографической съемки большей части суши земного шара (за исключением самых северных широт – выше  $60^{\circ}$  и самых южных широт – ниже  $54^{\circ}$ , а также океанов) и представленная в виде генерализованных данных с заявленной точностью не ниже 16 м (Level-1, 3 угловые секунды, [132]), была использована для получения цифровой информации о береговой зоне Телецкого озера и пойме устьевое участка реки Чулышман с учетом максимально возможных уровней воды при весенне-летнем половодье.

Данные об отметках высот и о глубинах, содержащиеся в перечисленных выше источниках, с помощью ArcGIS 9.3 были представлены в виде единой TIN, описывающей как котловину и береговую зону Телецкого озера, так и русло и пойму участка реки Чулышман. На рис. 2.4 представлена схема последовательности обработки описанного выше цифрового картографического материала.

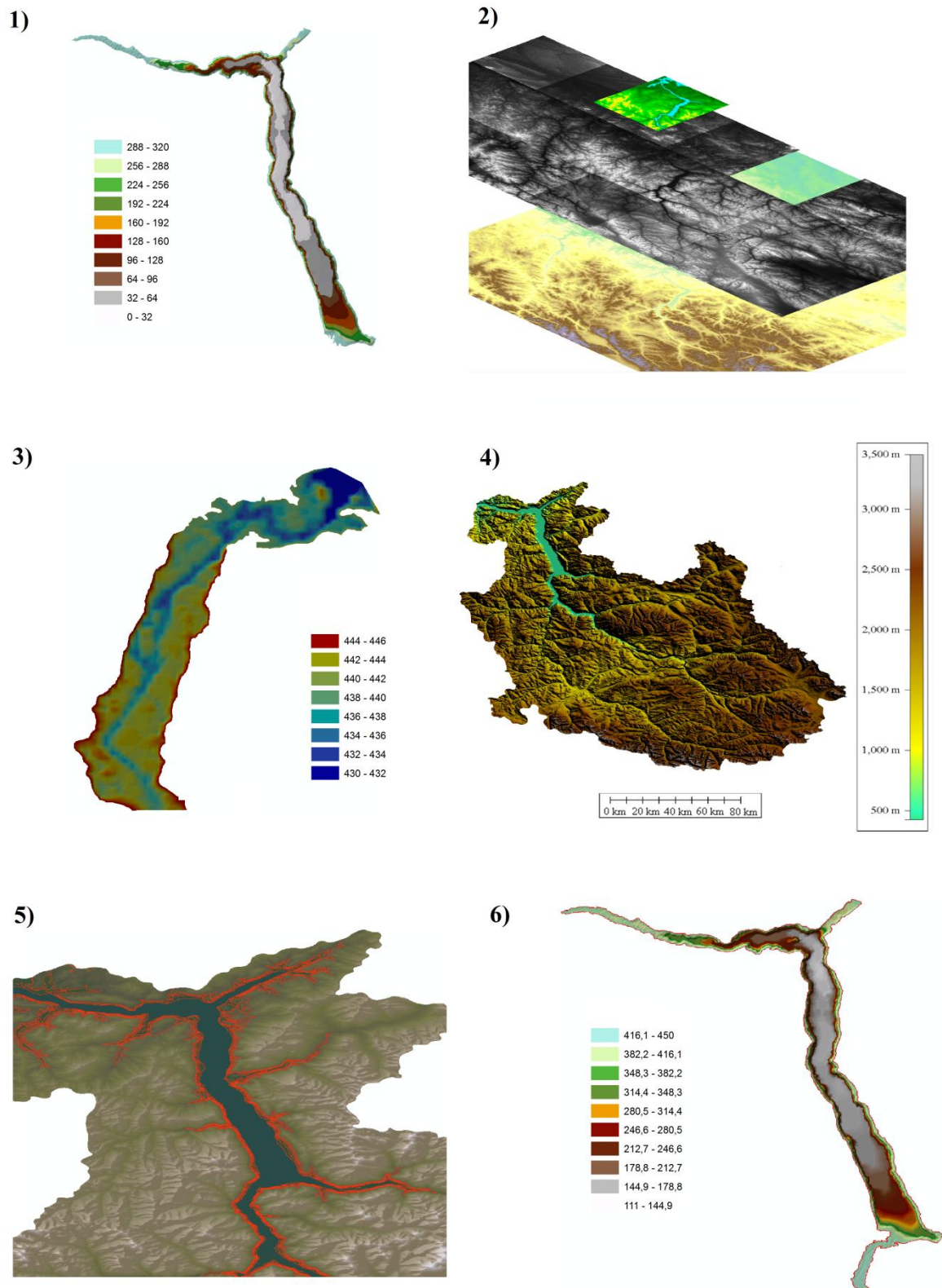


Рисунок 2.4 – Схема последовательности обработки цифровых картографических материалов: 1) цифровая батиметрическая карта Телецкого озера; 2) обработка в ArcGIS 9.3 цифровых моделей рельефа полученных из NOAA NGDC; 3) цифровая модель устьевое участка русла реки Чулышман; 4) цифровая модель рельефа (SRTM) бассейна озера; 5) результат обработки в ArcGIS 9.3 топографии береговой зоны; 6) результат генерации TIN.

После создания TIN производится последовательная декомпозиция моделируемой лимнологического-гидрологической системы на: 1) крупные водные объекты (WB) с характерными особенностями батиметрии, параметров экосистемы и с индивидуальным описанием метеорологических внешних воздействий; 2) отдельные участки (Br) в составе WB; 3) сегменты, на которые делятся Br; 4) слои по  $z$ , на которые, в свою очередь, делятся сегменты. Основой для указанной декомпозиции при разработке ИВК «Телецкое озеро» послужила хорошо обоснованная идея авторов работы [64] о целесообразности разбиения акватории Телецкого озера с учетом разнообразия глубин и термического режима на пять участков (см. рис. 1.1). Далее на основании данных высотных отметок поверхностей и глубин, содержащихся в TIN, и декомпозиции области моделирования (водные объекты → отдельные участки → сегменты → слои) с помощью WMS генерируется файл батиметрии модели W2.

По «феноменологическому» замыслу разработка описанных ниже расчетных сеток была ориентирована, прежде всего, на численные исследования гидродинамики и термического режима Телецкого озера, которые сравнительно хорошо обеспечены данными наблюдений и, главное, достаточно хорошо разработанными концептуальными схемами сезонной динамики циркуляции и термического режима как самого Телецкого озера [64–67], так и озер – аналогов [97–99]. В связи с этим, для численного исследования циркуляции и термического режима Телецкого озера были сгенерированы две расчетные сетки, отличающиеся друг от друга только сеточной аппроксимацией участка V (рис. 1.1) – южной оконечности озера, примыкающей к устью реки Чулышман. Это – сплошная расчетная сетка для участка V (далее PC1, см. фрагмент а на рис. 2.5) и расчетная сетка, аппроксимирующая Кыгинский залив в виде отдельного водотока (далее PC2, см. фрагмент в на рис. 2.5).

На рис. 2.5 показана схема расчетной сетки PC2, состоящая из 4 водных объектов: WB1 – участок реки Чулышман от г/п Балыкча до устья (представлен 3 участками Br1 – Br 3), WB2 – устьевой участок реки Чулышман (представлен Br4), WB3 – меридиональная часть озера (представлена тремя участками: Br5 – южная оконечность озера, примыкающая к устью реки Чулышман, Br6 – глубоководный меридиональный участок и Br7 - Кыгинский залив), WB4 – широтная часть озера (также представлена тремя участками: Br8 – глубоководный широтный участок, Br9 – северо-западный мелководный участок и Br10 - Камгинский залив). Фрагмент а рис. 2.5 также позволяет легко идентифицировать сетку PC1, в которой, как отмечалось выше, исключен участок Br7. Параметры WB1, WB2 и WB4 сеток PC1 и PC2 полностью совпадают. Общее число сегментов PC1 равно 292, PC2 – 356.

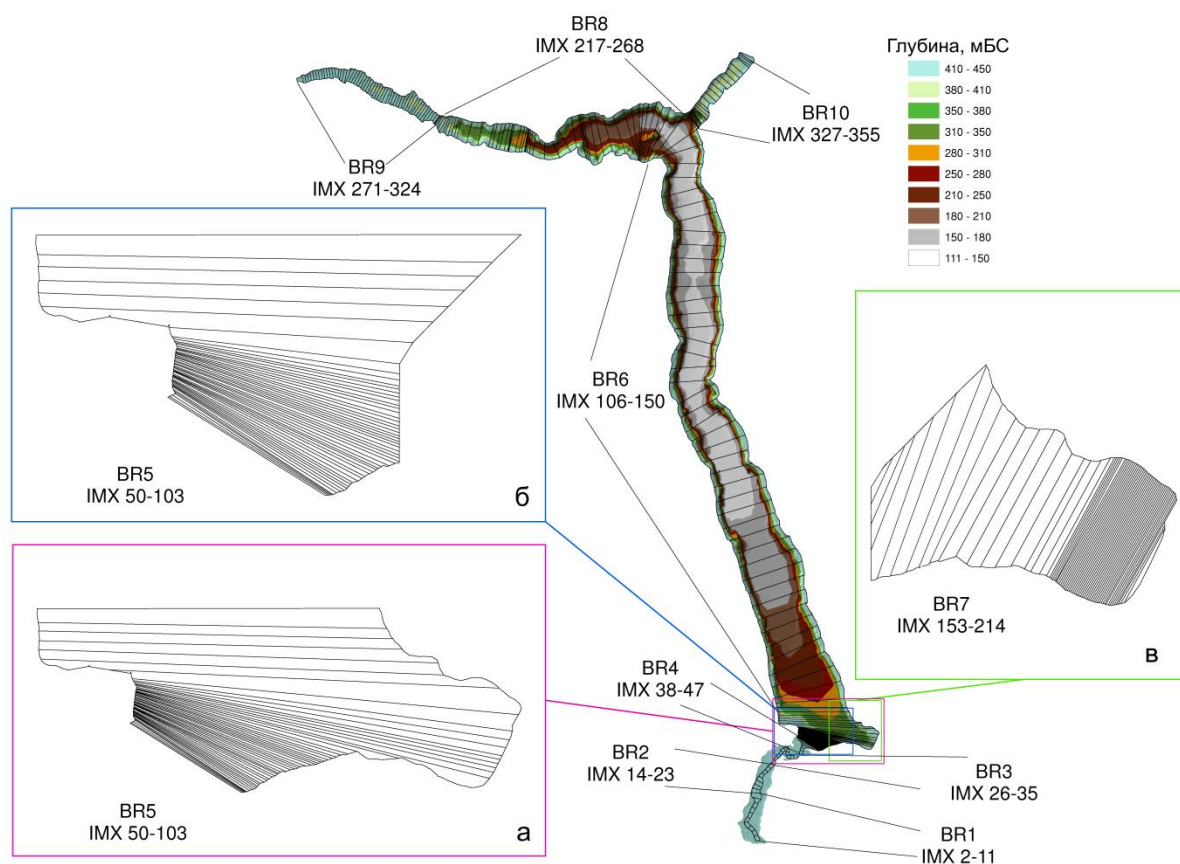


Рисунок 2.5 – Схема расчетной сетки устьевое участка реки Чулышман и Телецкого озера в плане: а) и б) южная оконечность озера, примыкающая к устью реки Чулышман – PC1 и PC2, соответственно; в) Кыгинский залив – PC2. IMX – номера сегментов

На рис. 2.6 показана расчетная сетка PC2 устьевое участка реки Чулышман и Телецкого озера в плоскости  $x-z$ . Толщины слоев воды речного участка (Br1 – Br3) заданы равными 0,5 м и самого озера (Br4 – Br10) - равными 1 м в слое от поверхности до глубины 110 м и 3 м ниже этой глубины до дна водоема. Длины сегментов в зависимости от распределения уклонов котловины озера по продольному профилю максимальных глубин изменялись от 20 до 1000 м (см. рис. 2.7). Длины сегментов речного участка, протяженностью 9300 м, изменялись от 180 до 400 м с уклонами равными: 0,00051 для Br1, 0,00065 для Br2, 0,00043 для Br3 (см. рис. 2.8).



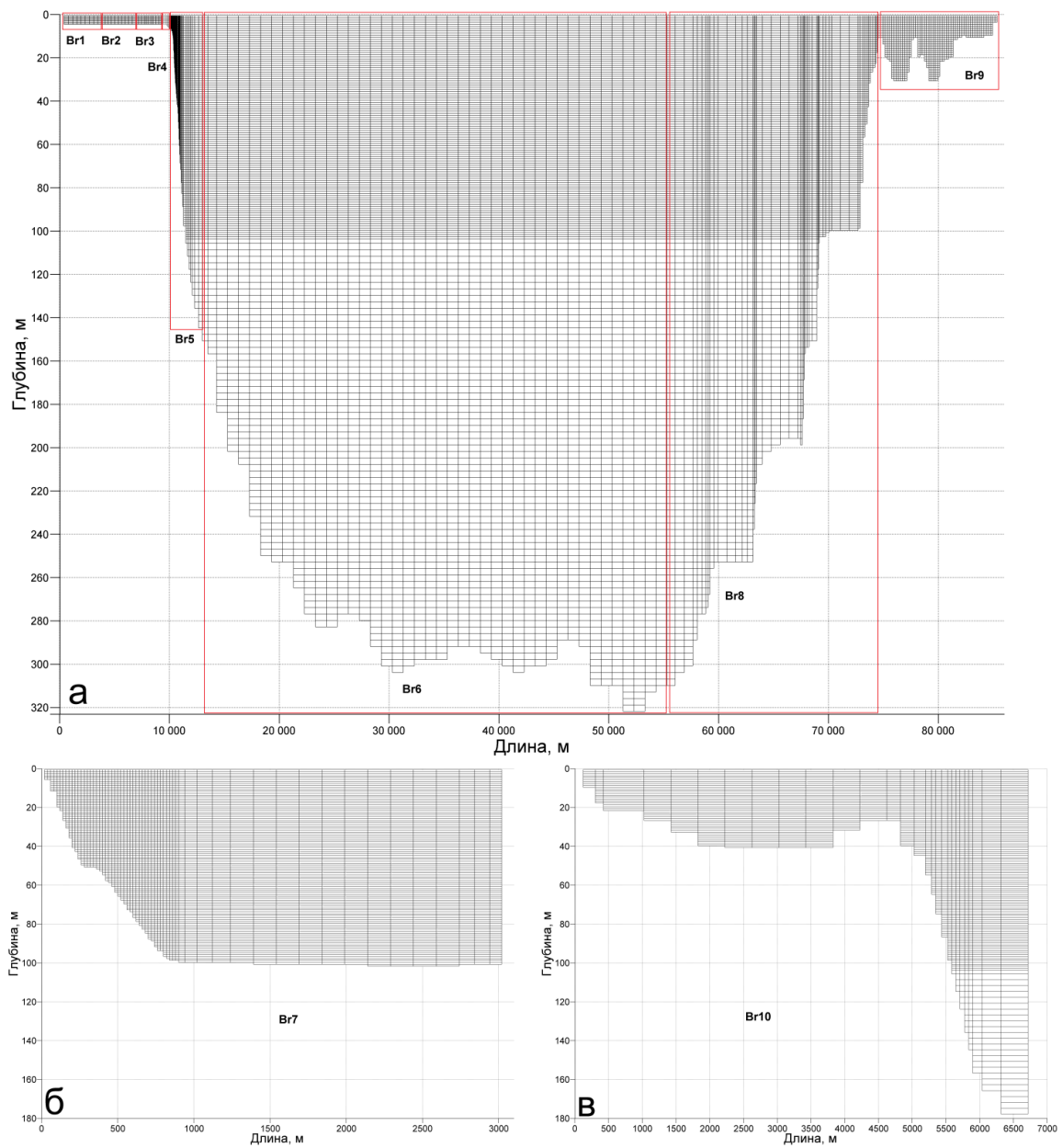


Рисунок 2.6 – Расчетная сетка РС2 устьевое участка реки Чулышман и Телецкого озера в плоскости  $x-z$ : а) основной продольный профиль участка реки (Br1– Br3), а также меридиональной (Br4– Br 6) и широтной (Br 8, Br9) частей озера; б) Кыгинский залив (Br7); в) Камгинский залив (Br10)

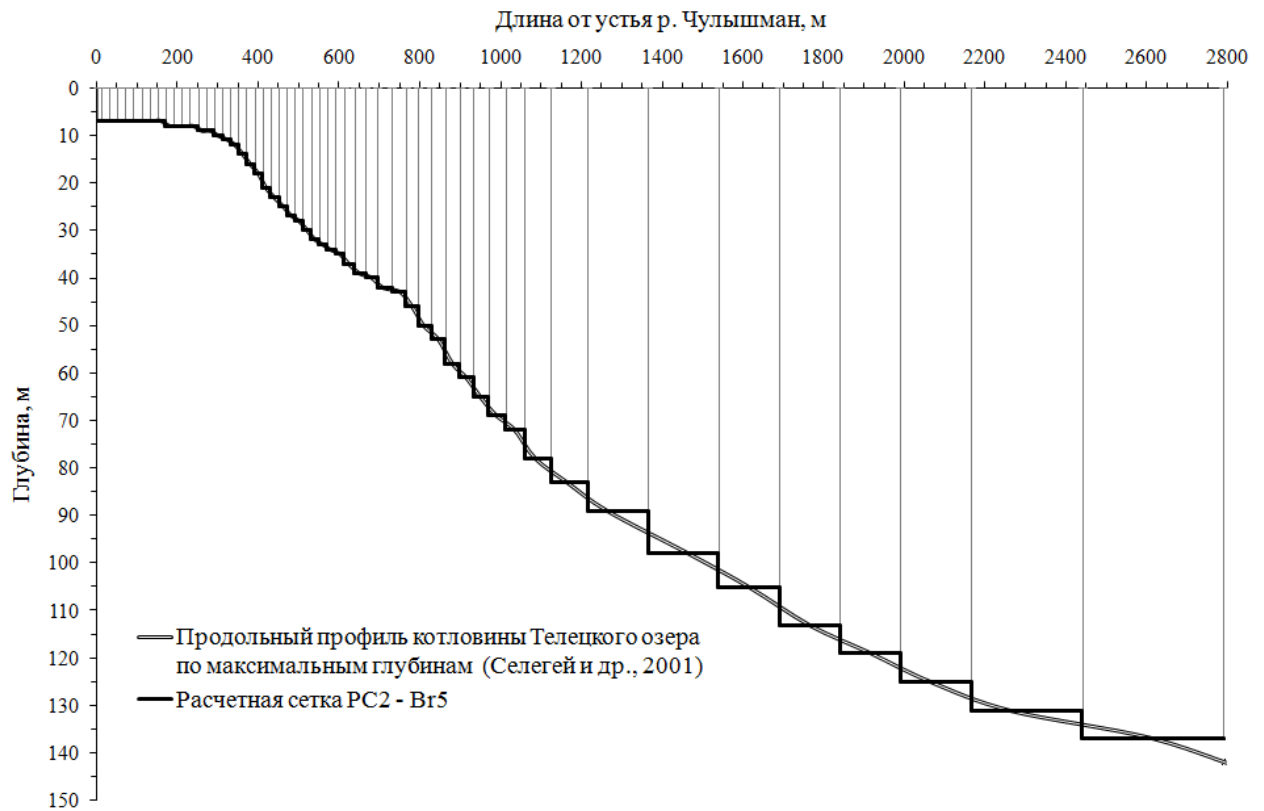


Рисунок 2.7 – Сравнение продольного профиля глубин части котловины Телецкого озера, примыкающей к устью р. Чулышман [62] и сегментов расчетной сетки PC2 – Br5 ИВК «Телецкое озеро»

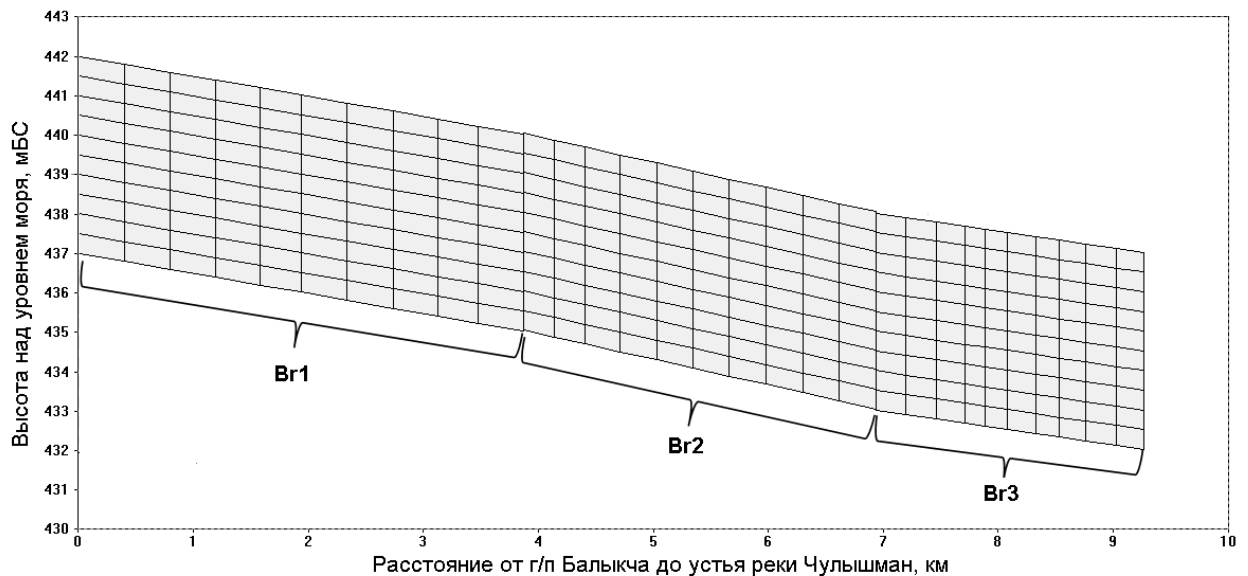


Рисунок 2.8. Расчетная сетка устьевое участка реки Чулышман в плоскости x-z

В заключение данного раздела отметим, что при разработке расчетной сетки для участка реки Чулышман нами был использован опыт применения модели W2 к участку среднего течения реки Северная Сосьва [54–56, 59].

### 2.3 Проблемы и программа калибровки и верификации ИВК «Телецкое озеро»

При системном исследовании водных объектов принципиально важным является этап калибровки, верификации и анализа чувствительности численной модели экосистемы [71, 123]. Именно на этом этапе формируется реальное качественное и количественное представление пользователя о возможностях и ограничениях модели динамики экосистемы как инструмента решения конкретных научных и практических задач в области использования и охраны водных ресурсов. Богатый опыт практического применения модели W2 [105] свидетельствует о целесообразности разбиения этапа калибровки и верификации на две последовательные стадии. На первой из них проводится калибровка и верификация блока описания гидродинамики и термического режима водного объекта, на втором – калибровка и верификация модели водной экосистемы в целом, т.е. модели, описывающей динамику взаимодействующих разномасштабных во времени и пространстве физических, химических и биологических процессов и явлений с учетом экосистемных внешних воздействий и антропогенных нагрузок. В данном разделе кратко обсудим основные проблемы, которые необходимо преодолеть при калибровке и верификации блока гидродинамики и термического режима модели W2 v.3.5 в составе ИВК «Телецкое озеро».

В числе упомянутых проблем остановимся на двух. Первая – это оценка адекватности и достаточности данных наблюдений, используемых при калибровке и верификации для задания начальных (уровни и температура воды, толщина льда Телецкого озера и устьевое участка реки Чулышман) и граничных условий: расход и температура воды на входном створе – г/п Балыкча (р. Чулышман); расход воды на замыкающем створе – г/п Артыбаш (исток р. Бия); метеорологические данные на м/с Беле, необходимые при задании переменных внешних атмосферных воздействий для WB1 – WB3, и м/с Яйлю, – для WB4; расход и температура воды в устьях боковых притоков.

Водный баланс Телецкого озера в значительной мере формируется за счет притока вод реки Чулышман (площадь водосбора которой составляет 84,3 % от всей площади водосбора озера) и боковой приточности (суммарная площадь водосбора боковых притоков составляет 15,7 %). Наиболее обременяющим для калибровки водного баланса Телецкого озера является дефицит данных гидрологических наблюдений в устьевых зонах боковых притоков к озеру [см. табл. 5, 64]. В БД ИВК «Телецкое озеро» включены имеющиеся данные наблюдений с гидропостов, расположенных на реках Чири, Кокши и Чеченег. В сумме это составляет около 3 % боковой приточности, оцениваемой по площади водосбора Телецкого озера. Однако данные о расходах и температуре воды на реках Кыга, Большие и Малые Чили, Камга, Колдор, Самыш и др. (в сумме они составляют около 13 % боковой приточности) отсутствуют. Различные способы решения данной проблемы предлагаются в работах [64, 105]. Для воспроизведения дефицита данных о расходах воды, указанных выше боковых притоков Телецкого озера, была использована сервисная

программа модели W2 «Водный баланс» (Water Balance Utility). Эта программа позволяет рассчитывать суммарную невязку расходов боковых притоков, которая необходима для точного количественного воспроизведения реально наблюдаемых уровней поверхности озера. В связи с необходимостью распределения суммарных невязок расхода боковых притоков была проведена декомпозиция водосборного бассейна озера на суббассейны впадающих в него рек. Далее эти суббассейны объединялись для каждого из пяти участков озера (см. рис. 1.1, участки I-V) и невязки расходов, пропорциональные площадям объединенных суббассейнов, включались в модель W2 как распределенные боковые притоки [105] в места впадения наиболее крупных рек участков I-IV [64]: Самыш (участок I), Колдор (участок II), Камга (участок III), Кокши и Большие Чили (участок IV) и Кыга (участок V).

Серьезный вызов, с которым приходится сталкиваться при калибровке и верификации, заключается в вопросе адекватности данных с м/с Беле и Яйлю для воспроизведения мезомасштабно неоднородных метеорологических полей в приводном слое атмосферы над акваторией озера с учетом эффектов светового и ветрового затенения от хребтов береговой зоны водоема. В. Селегей и Т. Селегей (1978) отмечают, что «для условий Телецкого озера, котловина которого представляет собой узкую глубокую долину, где господствующие ветры усиливаются, как в аэродинамической трубе, отношение скорости ветра над водоемом к скорости ветра над сушей колеблется от 0,50 до 2,89». В той же работе для характеристики метеорологических условий открытой части водоема были использованы синхронные наблюдения на исследовательском плоту и метеоплощадке пос. Яйлю за июнь – сентябрь 1968 г. в 07, 13 и 19 ч местного времени. Сопоставление показало, что температура воздуха над сушей в июне – июле в течение всего дня на 2 – 4 °C выше, чем над озером. Указанные обстоятельства требуют, на наш взгляд, планирования и решения следующих задач: а) проведение анализа чувствительности модели W2 при сценарных изменениях параметров метеорологических внешних воздействий, сформированных на основе данных с м/с Беле и Яйлю; б) полноценное использование значительных возможностей модели W2 по детальному (для каждого сегмента сетки) учету динамических эффектов светового и ветрового затенения поверхности водоема от хребтов береговой зоны (см. Приложение А, [105]) и в) разработка новой или адаптация известной численной негидростатической модели динамики мезомасштабных процессов в атмосфере над акваторией и береговой зоной Телецкого озера [см. раздел 4.1, 62; 70; 72]. Задача а) решалась при планировании и реализации численных экспериментов с сезонной изменчивостью параметров метеорологических внешних воздействий. Задачи б) и в) желательно решить в ближайшей перспективе.

Вторую проблему калибровки и верификации модели W2 для воспроизведения гидродинамики и термического режима Телецкого озера точно определяет позиция авторов

публикации [105]: «Глубокое понимание процессов, которые предстоит моделировать, также как знание воспроизводимой системы, являются абсолютно необходимыми, если мы хотим достичь цели, на которую направлено моделирование». В нашем случае речь идет о выборе базовой феноменологической модели сезонной динамики циркуляции и термического режима Телецкого озера. Феноменологическая модель термического режима Телецкого озера, разработанная В.В. Селегеем (см. раздел 1.2, главы 1), уступает по степени пространственно-временной детализации и глубине физической интерпретации термодинамических процессов, описываемых феноменологическими моделями озер Камлупс и Коотеней [97–99].

Объясняется это прежде всего тем, что пространственно-временное разрешение и интегральный информационный ресурс системы наблюдений за термическим режимом Телецкого озера на 1-2 порядка ниже, чем разрешение и ресурс соответствующих систем на озерах Камлупс и Коотеней. Характерный пример различия двух рассматриваемых концептуальных моделей связан с понятием «речной термический бар». Природа этого явления, его термодинамика полноценно раскрыты в концептуальной схеме [97]. Вместе с тем, в концептуальной модели Телецкого озера, как и в численных моделях этого водоема [33–37, 91], такое понятие вообще не используется. При разработке программы и конкретного плана калибровки и верификации ИВК «Телецкое озеро», описываемых ниже, за феноменологическую основу численных экспериментов была принята модель Селегея, при необходимости дополненная деталями феноменологической модели описанной в [97, 98].

Для проведения калибровки и верификации переменных гидродинамики и термического режима была разработана программа численных экспериментов с ИВК «Телецкое озеро», нацеленная на решения трех задач: I) численное исследование динамики проникновения вод реки Чулышман в меридиональную часть Телецкого озера в период весеннего половодья; II) численное исследование механизмов формирования особенностей термического режима и циркуляций Телецкого озера, включая термические бары, при сезонной изменчивости параметров метеорологических и гидрологических внешних воздействий; III) количественная оценка прогностических возможностей ИВК по воспроизведению динамики термического режима Телецкого озера при задании метеорологических и гидрологических внешних воздействий на основе использования суточных данных наблюдений за апрель-июль 1968 г. Для реализации этой программы был разработан план численных экспериментов, который включал три тематических блока, соответствующих трем указанным выше задачам. Основу плана составили базовые численные эксперименты, характеристики которых показаны в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Некоторые характеристики базовых численных экспериментов с ИВК «Телецкое озеро» для калибровки и верификации переменных гидродинамики и термического режима водоема

Задача и номер ЧЭ	Расчетная сетка	Начальные значения температуры озера		Метеорологические внешние воздействия		Гидрологические внешние воздействия			Примечание
		$T_L, ^\circ\text{C}$	$\gamma_L$	Ветровое воздействие	Теплообмен	$Q_{\text{Чул}}$	$Q_{\text{Бия}}$	$Q_{\text{бок.притоки}}$	
I.1	PC1	2,0	0	0	0	сезонные	сезонные	сезонные	Период моделирования в ЧЭ I.1-I.8 с 01 апреля по 5 июня среднего года
I.2	PC1	1,0	0	0	0	сезонные	сезонные	сезонные	
I.3	PC1	3,0	0	0	0	сезонные	сезонные	сезонные	
I.4	PC1	4,0	0	0	0	сезонные	сезонные	сезонные	
I.5	PC1	0,8 на поверхности	0,85 °C / 100 м	0	0	сезонные	сезонные	сезонные	
I.6	PC1	0,8 на поверхности	0,85 °C / 100 м	сезонные	сезонные	сезонные	сезонные	сезонные	
I.7	PC1	0,8 на поверхности	0,85 °C / 100 м	0	сезонные	сезонные	сезонные	сезонные	
I.8	PC1	0,8 на поверхности	0,85 °C / 100 м	сезонные	0	сезонные	сезонные	сезонные	
II.1	PC2	WB3: 0,8 на поверхности озера. WB4: от 0,1 до 0,6 в подледном слое воды толщиной 10 м	WB3: 0,85 °C / 100 м в слое от поверхности до глубины 190 м, ниже этой глубины - изотермия WB4: 0,6 °C / 100 м ниже глубины 10 м до глубины 190 м, ниже этой глубины - изотермия	сезонные	сезонные	сезонные	сезонные	сезонные	Период моделирования в ЧЭ II.1-II.4 с 01 апреля по 1 августа среднего года
II.2	PC2	—  —	—  —	0	сезонные	сезонные	сезонные	сезонные	
II.3	PC2	—  —	—  —	сезонные	сезонные	0	0	0	
II.4	PC2	—  —	—  —	0	сезонные	0	0	0	
III.1	PC2	—  —	—  —	суточные	суточные	суточные	суточные	суточные	Период моделирования в ЧЭ III.1 с 01 апреля по 1 августа 1968 года

Первый тематический блок включает в себя группу из 8 численных экспериментов (ЧЭ), проведенных с целью оценить возможности ИВК «Телецкое озеро» по воспроизведению характерных особенностей циркуляции и термического режима южной части водоема (участок V, см. рис. 1.1), генерируемых быстро прогреваемыми водами р. Чулышман в период весеннего половодья. Верификация этой группы ЧЭ проведена на основе качественного сравнения результатов расчетов с концептуальной схемой Кармака для трех фаз: F – ранняя весна, G – середина весны и H – поздняя весна периода весеннего нагревания. Краткое описание этих фаз дано разделе 1.2, полное – в работе [98]. Как уже отмечалось в разделе 1.1, данные мониторинга вертикальных профилей температуры воды на участке V между г/п Былыкча и гидрологическим разрезом м. Кырсай отсутствовали, поэтому количественная верификация результатов расчетов ЧЭ данной группы не проводилась.

В соответствии с анализом дат начала и длительности периода весеннего нагревания в различных частях Телецкого озера, проведенным в работе [64], за начало периода моделирования в ЧЭ данной группы выбрано 1 апреля и конец моделирования – 5 июня, когда в результате сезонного нагревания температура речной воды на г/п Балыкча достигала значения  $8^{\circ}\text{C}$ . Сезонная изменчивость базовых параметров гидрологических внешних воздействий –  $Q_{\text{Чул}}$  (расход),  $T_{\text{Чул}}$  (температура воды) реки Чулышман и  $Q_{\text{Бия}}$  (расход) реки Бия – задавалась на основе данных измерений на г/п Балыкча и г/п Артыбаш, осредненных по декадам за период 1968-72 гг. Значения этих параметров, приведенные в табл. 2.2, принимались одинаковыми во всех ЧЭ первого тематического блока. В табл. 2.2 также приведены осредненные по декадам за период 1968-1972 гг. значения уровней воды Телецкого озера ( $Z_{\text{Тел\_оз}}$ ), которые использовались для расчета расходов боковых притоков рек Кыга, Большие Чили, Кокши, Самыш, Колдор, Камга (номера сегментов на РС1: 95, 120, 130, 166, 210, 263, соответственно). Даты перехода  $T_{\text{Чул}}$  через 1, 2, 3, 4, 6, 8  $^{\circ}\text{C}$  – 5.04, 13.04, 17.04, 24.04, 19.05, 5.06, соответственно.

Таблица 2.2 – Значения переменных гидрологических внешних воздействий, задаваемые в численных экспериментах блока I.

Дата*	1.04	10.04	20.04	30.04	10.05	20.05	30.05	5.06
$T_{\text{Чул}}, ^{\circ}\text{C}$	0,7	1,25	3,52	4,68	4,8	6,08	7,2	8,8
$Q_{\text{Чул}}, \text{м}^3/\text{с}$	13,7	15,3	41,7	91,7	210,3	456,9	860,8	665,2
$Q_{\text{Бия}}, \text{м}^3/\text{с}$	28,9	30,9	38,8	51,4	158,2	372,6	964,1	965,9
$Z_{\text{Тел\_оз}}, \text{мБС}$	432,9	432,95	432,93	433,01	433,47	434,15	434,75	435,15

В численном эксперименте I.1 точно воспроизведены условия, при которых «работает» гипотетическая схема Кармака [97], описывающая 4 последовательных типа циркуляции (a, b, c, d), обусловленных проникновением быстро прогреваемых весной речных вод в глубокое озеро, температура воды ( $T_L$ ) в котором задана равной  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 1.3 и соответствующее описание в главе 1, раздел 1.2). Численные эксперименты I.2–I.4 отличаются от I.1 только одним параметром – начальной температурой озера. Значения  $T_L$  в экспериментах I.2–I.4 равны 1.0, 3.0 и 4.0  $^{\circ}\text{C}$ , соответственно. В последующих численных экспериментах I.5–I.8 рассматриваются случаи исходно (1 апреля) стратифицированного водоема с  $T_L = 0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  на поверхности и с вертикальным градиентом температуры  $\gamma_L = 0,85\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ м}$  от поверхности до дна. Конкретные значения этих параметров были рекомендованы нам В.В. Селегеем как типичные для участка V в конце периода «зимнего минимума». Между собой ЧЭ I.5–I.8 отличаются различными сценариями задания параметров метеорологических внешних воздействий (см. табл. 2.1). Значения начальных уровней воды в реке Чулышман и Телецком озере задавались одинаковыми в ЧЭ I.1–I.8. Для Телецкого озера он был равен средневзвешенному уровню, вычисленному по данным четырех озерных гидрологических постов (см. рис. 1.1) за период 1968–1972 гг., а именно, 432,9 м БС. На участке р. Чулышман начальные условия для  $\eta$  рассчитывались с помощью линейной интерполяции значений уровня между г/п Балыкча и озером. Начальная температура воды участка реки Чулышман была задана одинаковой в этих численных экспериментах и равнялась среднемноголетнему значению на 1 апреля для г/п Балыкча –  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Второй тематический блок в табл. 2.1 представлен численными экспериментами II.1 – II.4 с периодом моделирования, который начинался 1 апреля и заканчивался 1 августа среднего года за период 1968–1972 гг. Особенностью задания начальных полей в ЧЭ II.1 – II.4 является описание наличия 1 апреля ледового покрова на широтном участке озера, включая Камгинский залив (WB4). Параметры распределения  $T_L$  в подледном слое воды (WB4) и в меридиональной части озера (WB3), представленные в табл. 2.1, задавались на основе данных наблюдений [64] и дополнительных численных экспериментов по калибровке подмодели «ледовый покров» [105]. Начальные значения  $T$  и  $\eta$  на участке реки Чулышман задавались так же, как в численных экспериментах I.1–I.8. Пример сезонной изменчивости параметров метеорологических внешних воздействий: температура воздуха, температура точки росы, скорость и направление ветра, балл облачности, рассчитанных по данным м/с Беле для WB1 – WB3, показан на рис. 2.9. Ветровое воздействие на акваторию озера в этом тематическом блоке задавалось согласно следующему сценарию повторяемости ветра за каждую декаду по направлениям [64]: для WB3 – 5 суток ветер южного направления («верковка»), 1 сутки штиль, 3 суток ветер северного направления («низовка»), 1 сутки



штиль; для WB4 – 5 суток ветер восточного направления («верковка»), 1 сутки штиль, 3 суток ветер западного направления («низовка»), 1 сутки штиль. На рис. 2.10 приведен временной ход параметров основной части гидрологических внешних воздействий: температура и расход воды р. Чулышман и расход воды р. Бия за весь период моделирования в ЧЭ II.1 – II.4.

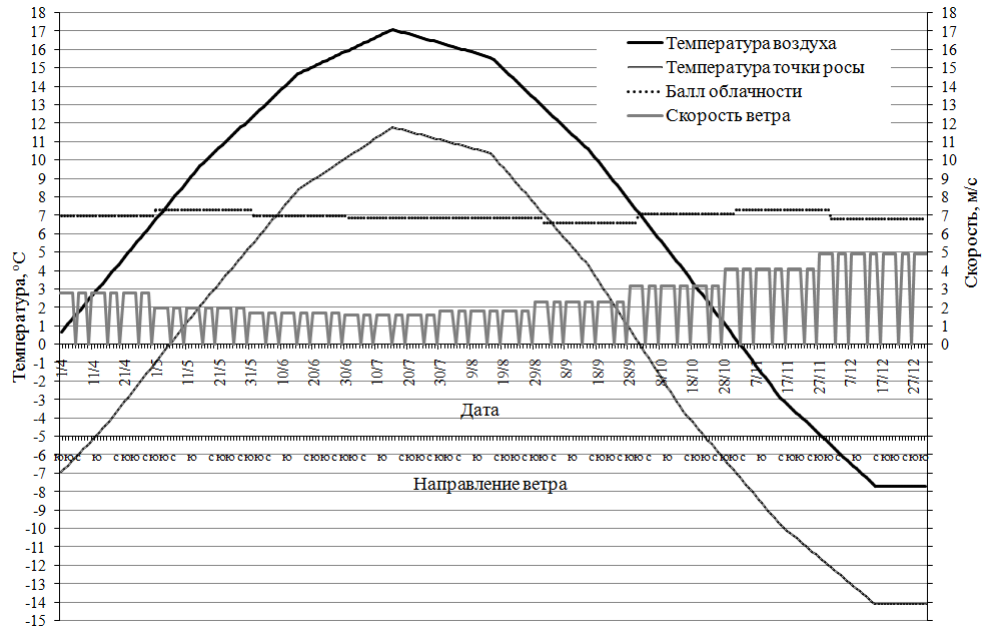


Рисунок 2.9 – Сезонная изменчивость параметров метеорологических внешних воздействий с 1 апреля по 31 декабря среднего года за период 1968-1972 гг., м/с Беле

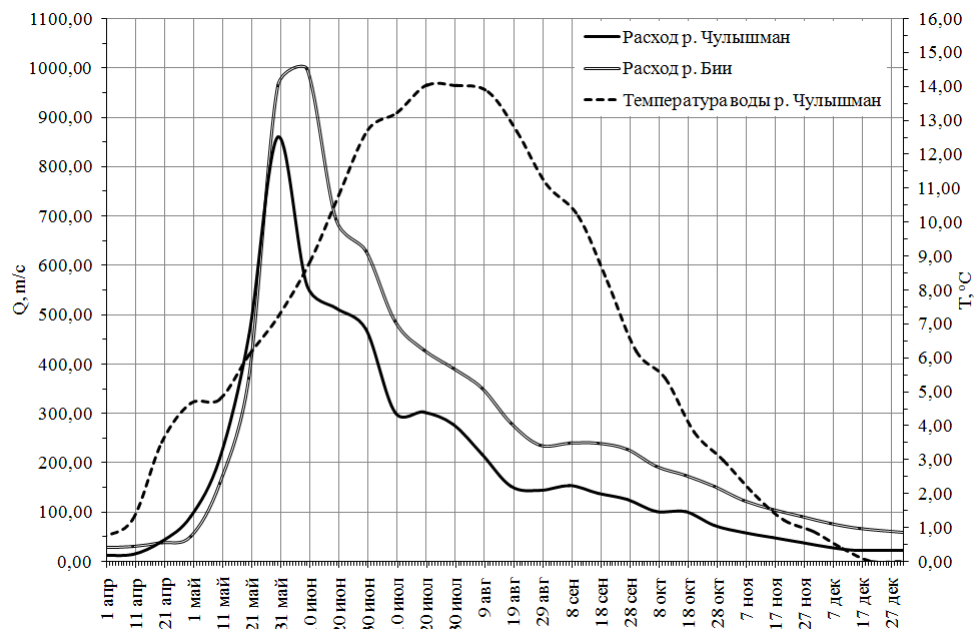


Рисунок 2.10 – Сезонная изменчивость параметров основных гидрологических воздействий р. Чулышман (г/п Балыкча) и р. Бия (г/п Артыбаш), с 1 апреля по 31 декабря среднего года за период 1968-1972 гг.

Базовыми во втором тематическом блоке являются численные эксперименты П.1, в котором включено полное описание сезонной изменчивости внешних атмосферных и гидрологических воздействий на термодинамику озера, и П.3 – с сохранением идентичного П.1 описания метеорологического воздействия, но с полным исключением гидрологических внешних воздействий, т.е. при  $Q_{\text{чул}} = Q_{\text{Бия}} = Q_{\text{бок.притоки}} = 0$ . Сопоставительный анализ результатов расчетов ЧЭ П.1 и П.3 позволяет дать качественную и количественную оценку фундаментальных механизмов формирования и трансформации термических баров Телецкого озера. Верификация ЧЭ второго тематического блока проводилась на основе качественного и при наличии репрезентативных данных количественного сравнения результатов расчетов с феноменологической моделью Селегея, подробно описанной в главе 1, разделе 1.2.

Полноценная количественная верификация, основанная на сравнении результатов прогностических расчетов  $T_L$  и соответствующих данных наблюдений на всех гидрологических вертикалях (см. рис. 1.1) Телецкого озера за период с 1 апреля по 1 августа 1968 г., была проведена при реализации численного эксперимента третьей тематической группы. Начальные поля численной модели W2 в эксперименте П.1 задавались с привлечением максимально полного набора данных наблюдений Озерной станции в конце марта – начале апреля 1968 г. Переменные метеорологических внешних воздействий в этих ЧЭ сформированы на основе 8-срочных данных м/с Беле (WB2-3) и м/с Яйлю (WB4) с контролем качества и визуализацией исходных данных. Пример фрагмента переменных метеорологических внешних воздействий (температура воздуха, температура точки росы, скорость и направления ветра, балл облачности на м/с Беле) за период с 1 по 10 июня 1968 г. представлен на рис. 2.11 и 2.12.

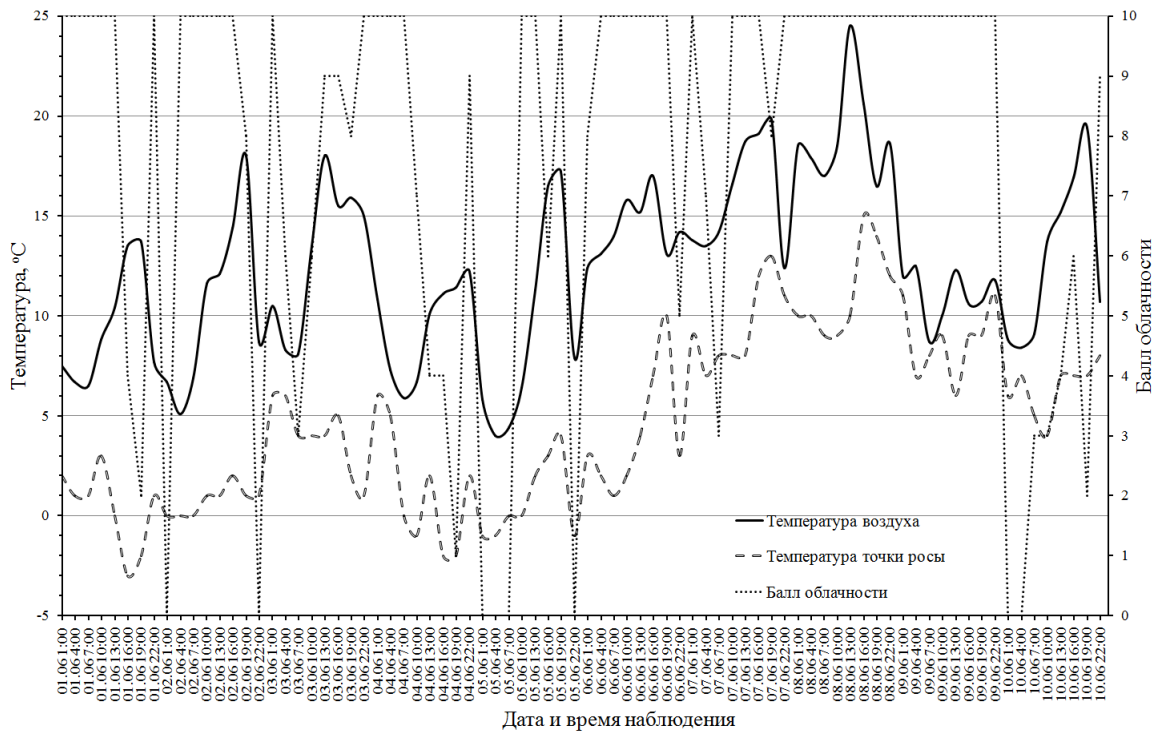


Рисунок 2.11 – Фрагмент временного хода параметров метеорологических внешних воздействий: температура воздуха, температура точки росы и балл облачности по данным м/с Беле с 1 по 10 июня 1968 г.

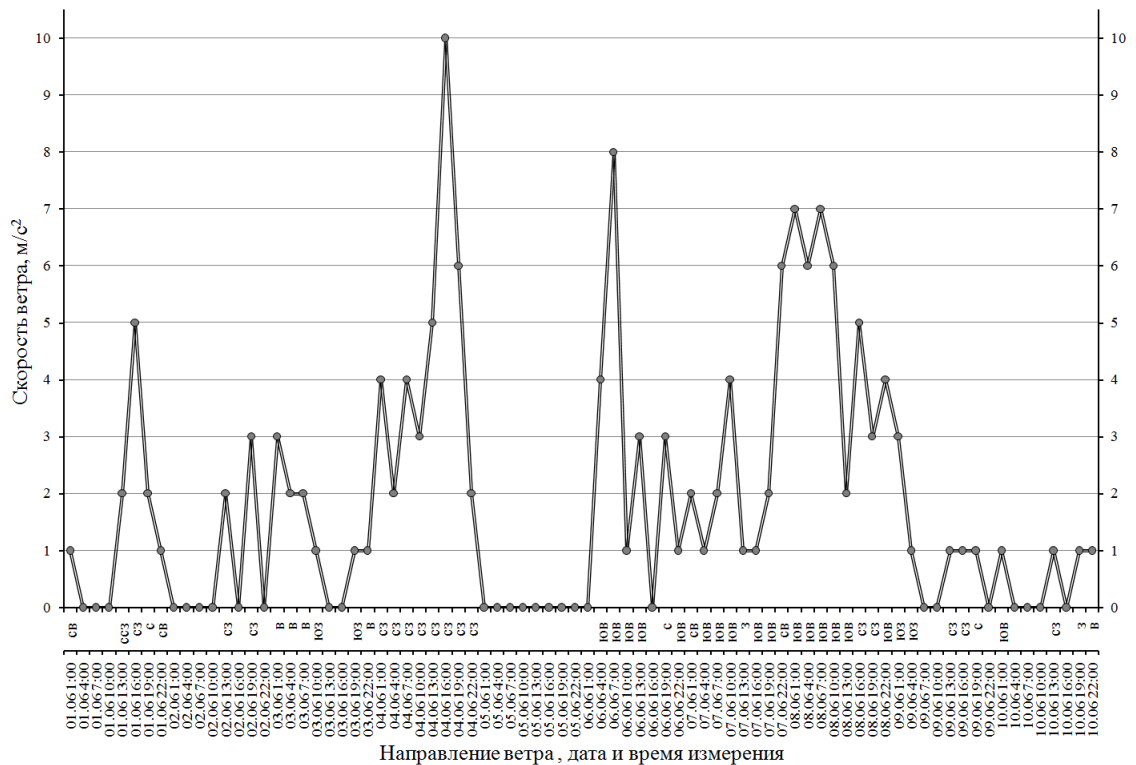


Рисунок 2.12 – Фрагмент временного хода параметров метеорологических внешних воздействий: скорость и направление ветра по данным м/с Беле с 1 по 10 июня 1968 г.

Переменные гидрологических внешних воздействий в ЧЭ Ш.1 задавались на основе проконтролированных данных суточных наблюдений на всех гидропостах Озерной станции

за период с 1 апреля по 1 августа 1968 г. На рис. 2.13 показан пример временного хода параметров гидрологических внешних воздействий: температура и расход воды на г/п Балыкча (р. Чулышман) и расход воды на г/п Артыбаш (р. Бия) с 1 апреля по 1 августа 1968 г.

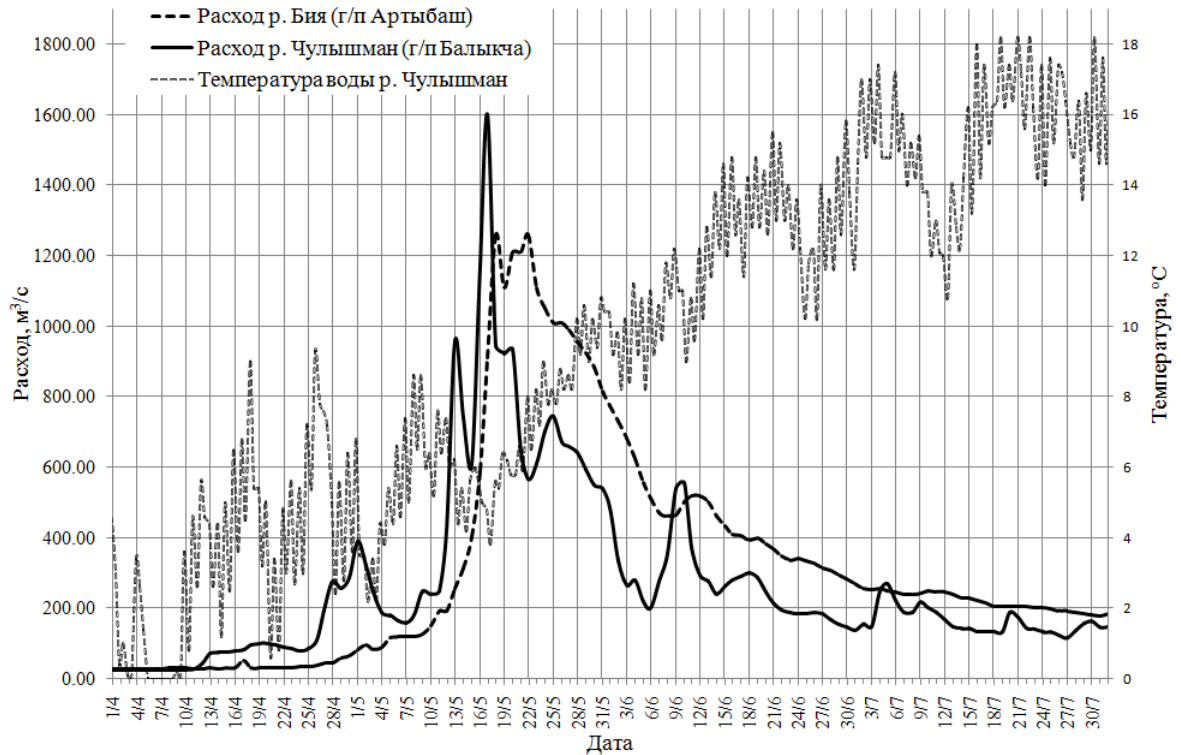


Рисунок 2.13 – Временной ход параметров гидрологических внешних воздействий: температура и расход воды на г/п Балыкча (р. Чулышман) и расход воды на г/п Артыбаш (р. Бия) с 1 апреля по 1 августа 1968 г.

Перечень численных экспериментов, включенных в табл. 2.1, образно можно сравнить с «надводной частью айсберга». Существенно большее (приблизительно на два порядка) количество экспериментов («подводная часть айсберга») было проведено при калибровке модели W2 с целью уточнения ее многочисленных физических параметров и тестирования различных подмоделей и схем, задаваемых в контрольном файле W2 для описания теплообмена на поверхности раздела «вода – воздух», динамики ледового покрова, расчета значений коэффициентов вертикальной вихревой диффузии и дисперсии и т.п. В табл. 2.3 представлены итоговые калибровочные параметры модели W2, которые задавались одинаковыми во всех численных экспериментах трех тематических блоков, представленных выше.

Таблица 2.3 – Значения калибровочных параметров численной модели W2 (обозначения из [105]), задаваемые одинаковыми во всех численных экспериментах трех тематических блоков

Параметр	Описание	Калибровочные значения
<b>Коэффициенты теплообмена</b>		
BETA	Доля падающей солнечной радиации поглощенная на поверхности воды	0.45
AFW	Коэффициенты в формулировке параметрического учета скорости ветра	7
BFW		0.46
CFW		2
WINDH (м)	Высота измерения скорости ветра	10
CBHE (Вт м <sup>-2</sup> с <sup>-1</sup> )	Коэффициент теплообмена на границе раздела «вода – донные отложение»	7 10 <sup>-8</sup>
TSED (°C)	Температура донных отложений	4
TSEDF	Теплопотери от донных отложений, которые переходят к столбу воды	1
SHADE	Коэффициент светового затенения (статическое затенение)	0.8 – 1
WSC	Коэффициент ветрового затенения	0.1 – 0.85
<b>Коэффициенты подмодели «ледовый покров»</b>		
ALBEDO	Отношение отраженной радиации к приходящей радиации (альбеде льда)	0.25 – 0.9
HWICE	Коэффициент теплообмена на границе «вода – лед»	10
BETAI	Доля солнечной радиации, поглощенной на поверхности льда	0.6
GAMMAI (м <sup>-1</sup> )	Коэффициент ослабления солнечной радиации, проходящей через лед	0.07
ICEMIN (м)	Минимальная толщина льда	0.05
ICET2 (°C)	Температура, выше которой лед не образуется	3
<b>Гидравлические коэффициенты</b>		
AX (м <sup>2</sup> /сек)	Коэффициент продольной вихревой вязкости (дисперсия импульса вдоль оси X)	1
DX (м <sup>2</sup> /сек)	Коэффициент продольной вихревой диффузии (дисперсия тепла и примеси вдоль оси X)	1
FRICC	Коэффициенты придонного трения (Маннинг)	0.025 – 0.05

Для описания процессов теплообмена на поверхности воды использовалась подмодель TERM, основанная на расчете составляющих радиационного и теплового балансов [105] на поверхности раздела «вода – воздух». Конкретные значения параметров подмодели TERM, а также параметров, определяющих процессы теплообмена на поверхности раздела «вода – донные отложения» (CBHE, TSED, TSEDF) и коэффициенты светового (SHADE) и ветрового (WSC) затенения, приведены в первом блоке табл. 2.3. Коэффициенты ветрового затенения задавались равными 0,8 для основной акватории озера, 0,1 и 0,3 – для Кыгинского и Камгинского заливов, соответственно. Коэффициенты

светового затенения варьировались в зависимости от высоты хребтов, окружающих озеро, в диапазоне величин от 0,8 до 1. Расчет коэффициентов вертикальной вихревой вязкости и диффузии в уравнениях (1) – (6) проводился с помощью подмодели ТКЕ, основанной на одном из вариантов  $k$ - $\epsilon$ -модели замыкания при описании турбулентности [105]. Для расчета переменных динамики ледового покрова использовалась подмодель DETAIL, конкретные значения параметров которой приведены в блоке «ледовый покров» табл. 2.3. Значения гидравлических коэффициентов модели W2 (AX, DX, FRICC), с которыми проведены расчеты, представлены в заключительной части табл. 2.3. Для участка реки Чулышман коэффициент придонного трения принимался равным 0,05, т.е как для каменистых русел с бурным течением [69]. Для Телецкого озера значения коэффициентов Маннинга задавались равными 0,025 [96]. Численное решение модели W2 во всех экспериментах было получено с помощью схемы ULTIMATE (см. раздел 2.1.1, данной главы).

### **3 Численное исследование динамики проникновения вод реки Чулышман в меридиональную часть Телецкого озера в период весеннего половодья**

В данном разделе описаны результаты первого тематического блока программы численных экспериментов с ИВК «Телецкое озеро». Конкретно в подразделе 3.1 представлены результаты анализа ЧЭ I.1 – I.4 и в подразделе 3.2 – результаты анализа ЧЭ I.5 – I.8.

#### **3.1 Численное воспроизведение стадий проникновения речных вод в глубокое межгорное озеро, описываемых гипотетической схемой Кармака. Оценки влияния начальной температуры озера на циркуляции схемы Кармака**

Численный эксперимент I.1 (см. табл. 2.1) исходно был задуман для того, чтобы провести качественное сравнение гипотетической схемы Кармака [97] с четырьмя последовательными типами циркуляций а, б, с и d (см. рис. 1.3), возникающих при проникновении быстро прогреваемых весной речных вод в глубокое межгорное озеро и результатов расчетов в ЧЭ I.1. Как и в упомянутой схеме, начальная температура воды в озере (WB 2-4) в ЧЭ I.1 задавалась равной  $2^{\circ}\text{C}$ , метеорологический форсинг (теплообмен и ветровое воздействие) был отключен. Значения переменных гидрологических внешних воздействий в этом эксперименте приведены в табл. 2.2 и показаны на рис. 2.10.

Достаточно полное представление о динамике проникновения речных вод Чулышмана с начальной  $T_{чыл}$ , равной  $0,7^{\circ}\text{C}$ , в устьевой участок реки – Br4 или WB2 (см. рис. 2.6 а, длина участка – 1000 м, перепад глубин от 1 до 5 м) за период с 04.04 по 26.04 дает рис. 3.1. На этом рисунке для удобства интерпретации пространственно-временной динамики моделируемых процессов выделены следующие зоны: «речная вода», «озерная вода» и транзитная зона – «смесь», в которой происходит непосредственный контакт и перемешивание речной и озерной воды. Из фрагментов а и б рис. 3.1 хорошо видно, что в первой половине апреля, когда  $T_{чыл}$  меньше чем  $T_L$ , речная вода проникает в озеро в виде поверхностного потока толщиной около 2 м. При этом в ниже расположенной озерной воде фиксируется слабое компенсационное противотечение, а зона смеси речной и озерной воды «отжимается» речным потоком от середины к левой границе участка Br4 по мере повышения значений  $T_{чыл}$ . К 21.04 (фрагмент в рис. 3.1) речные воды занимают почти весь объем Br4, кроме зоны «смесь», которая фиксируется вблизи левой границы участка. Как видно из фрагмента г рис. 3.1 к 26.04, весь объем Br4 оказывается занятым речной водой с температурой выше  $T_{md}$ .

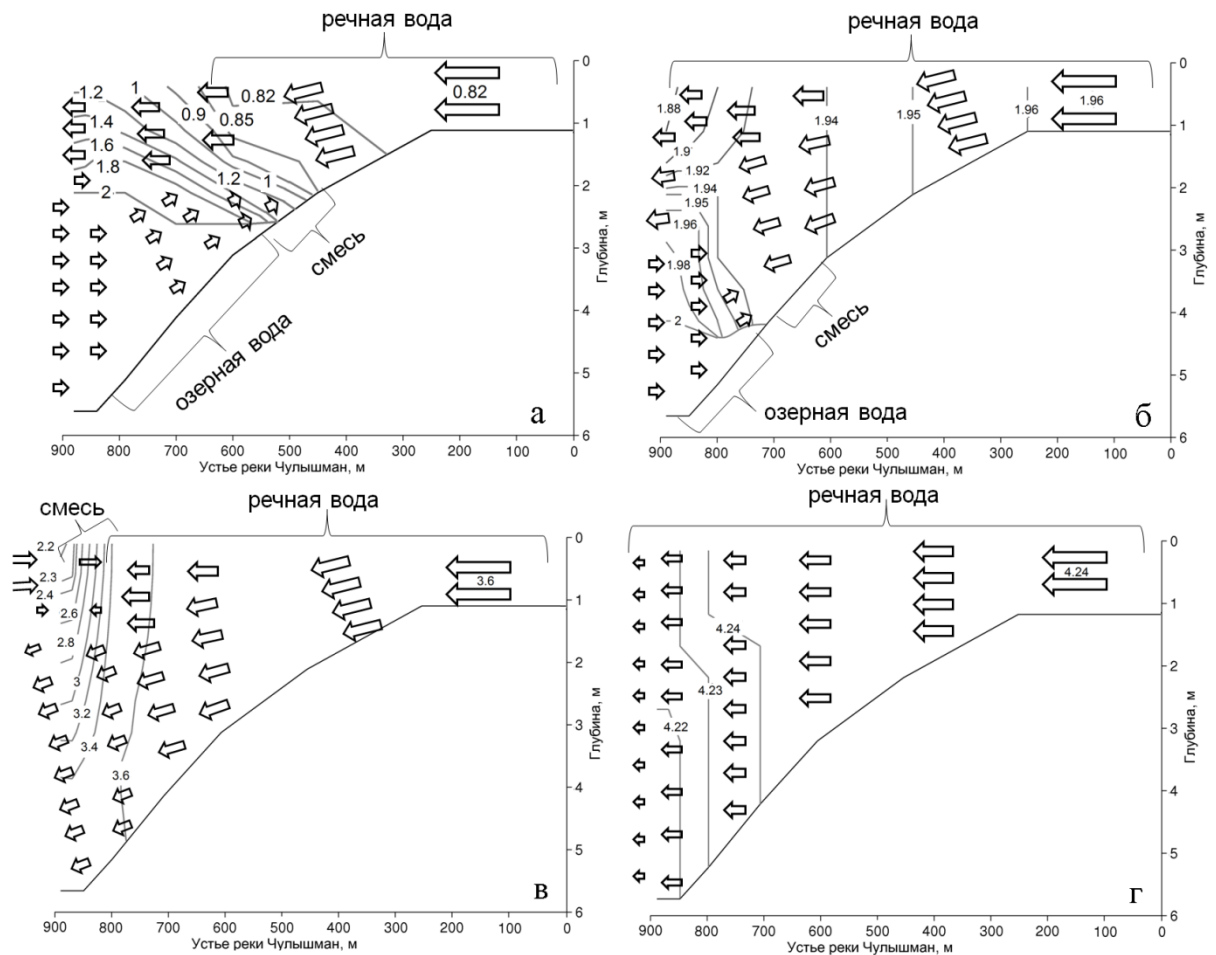
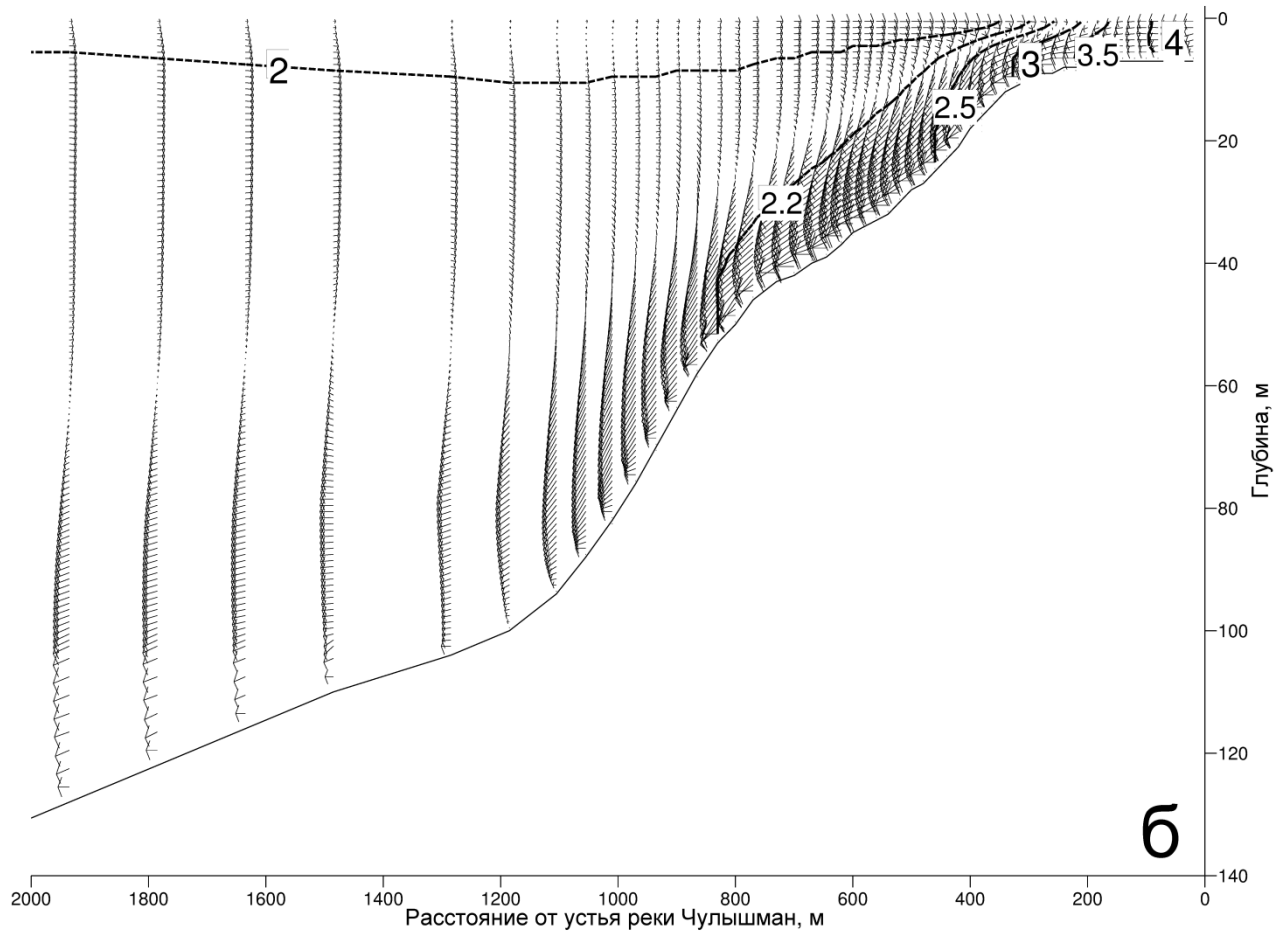
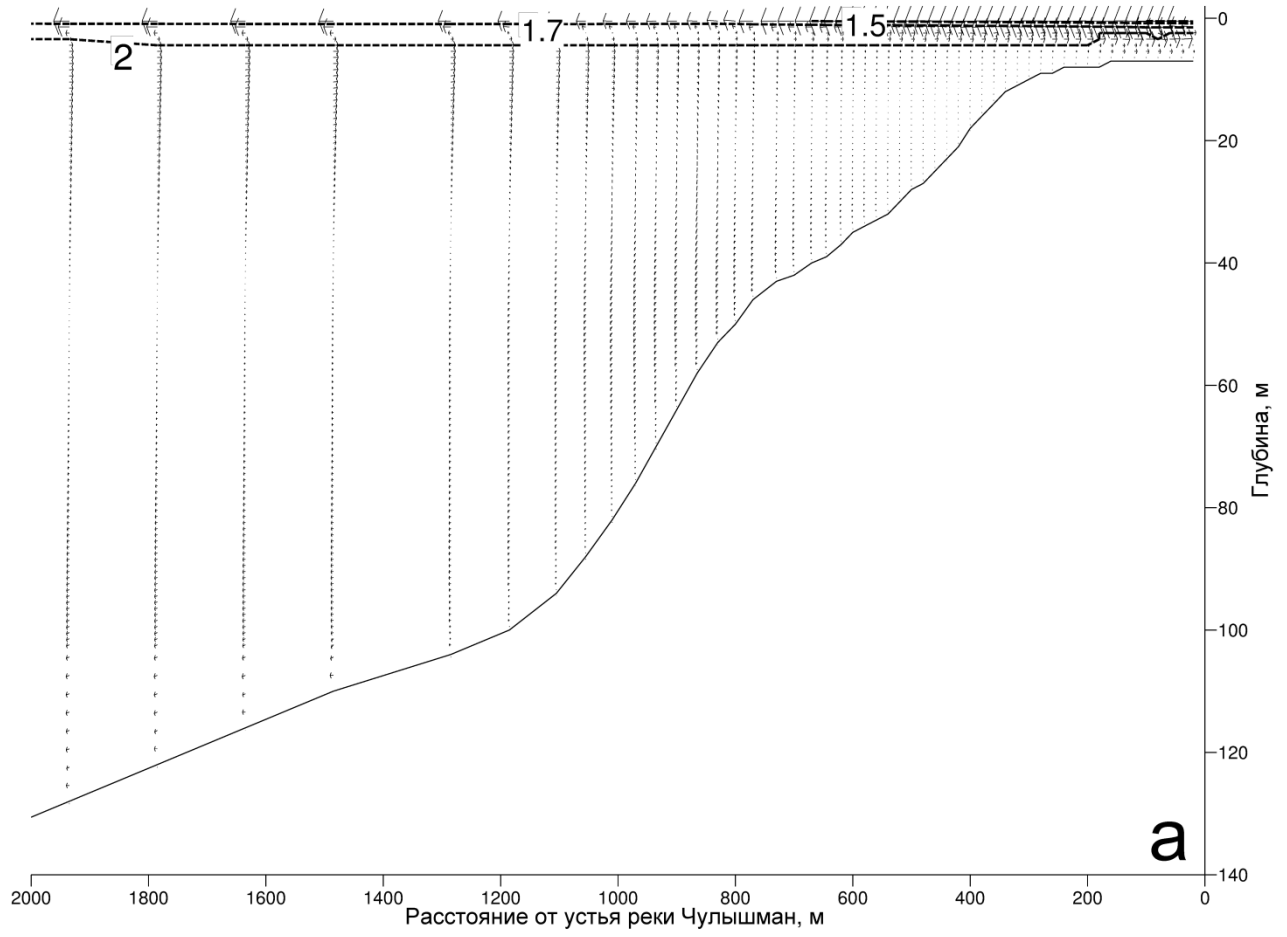


Рисунок 3.1 – Схематическое представление проникновения речных вод и их взаимодействие с озерной водой в устьевом участке Вг4 (WB2) на 4.04 (фрагмент а), 13.04 (б), 21.04 (в) и 26.04 (г). Стрелками показаны векторные поля скорости течения воды, сплошными кривыми – изотермы

Результаты расчетов ЧЭ I.1 для участка Вг5 (предустьевой склон в составе WB3, см. рис. 2.6 а) на 10.04 (фрагмент а), 26.04 (б), 20.05 (в) и 05.06 (г), когда значения температуры воды на входном сегменте участка достигали значений 1.5, 4, 6 и 8 °С, соответственно, показаны на рис. 3.2 в виде полей температуры и векторного представления течений. Последовательное сопоставление фрагментов а, б, с и д рис. 1.3 [97] и соответствующих фрагментов на рис. 3.2 позволяет сделать однозначный вывод о феноменологическом подобии типов циркуляции в гипотетической схеме Кармака и воспроизводимых в ЧЭ I.1.





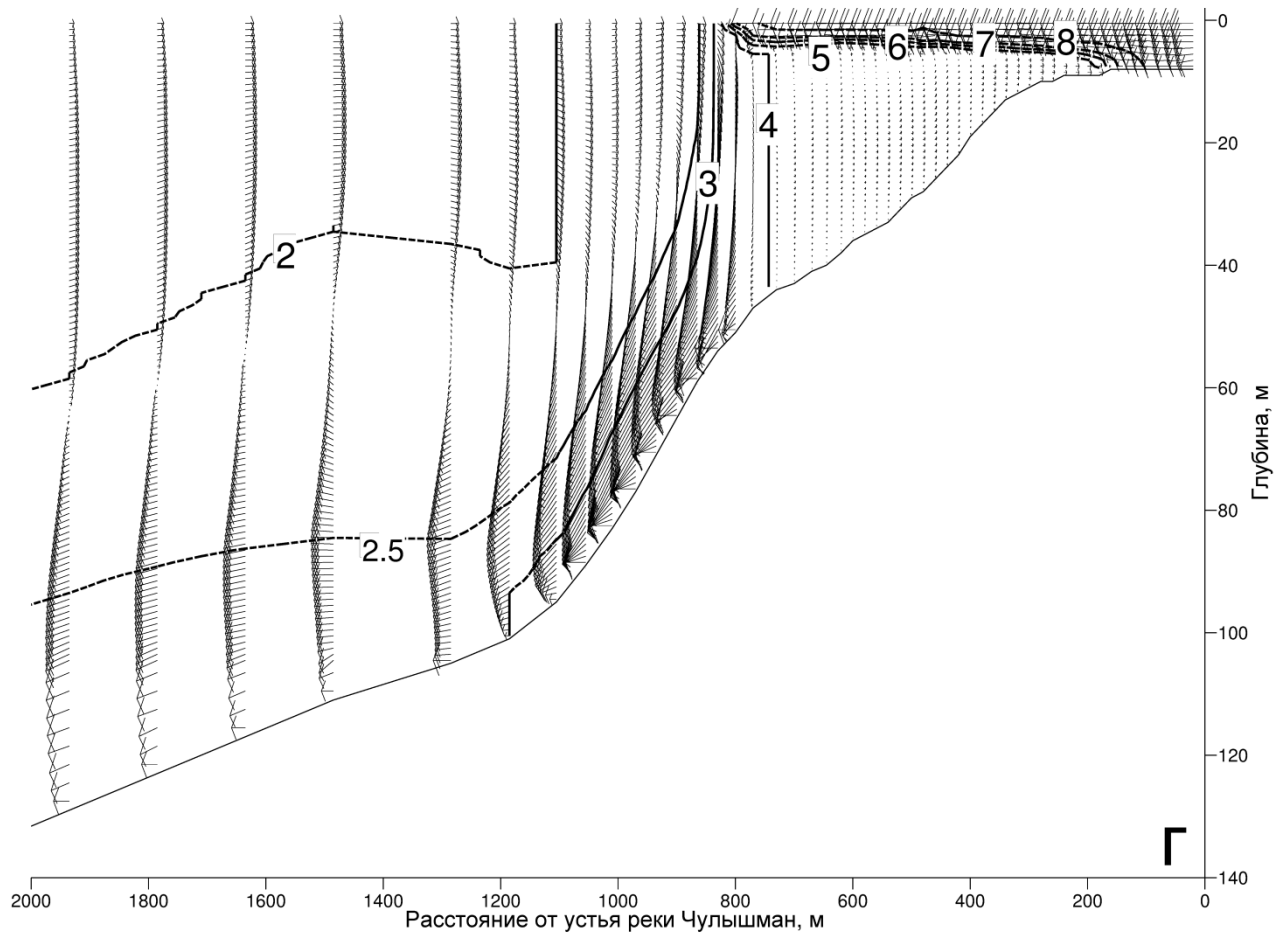
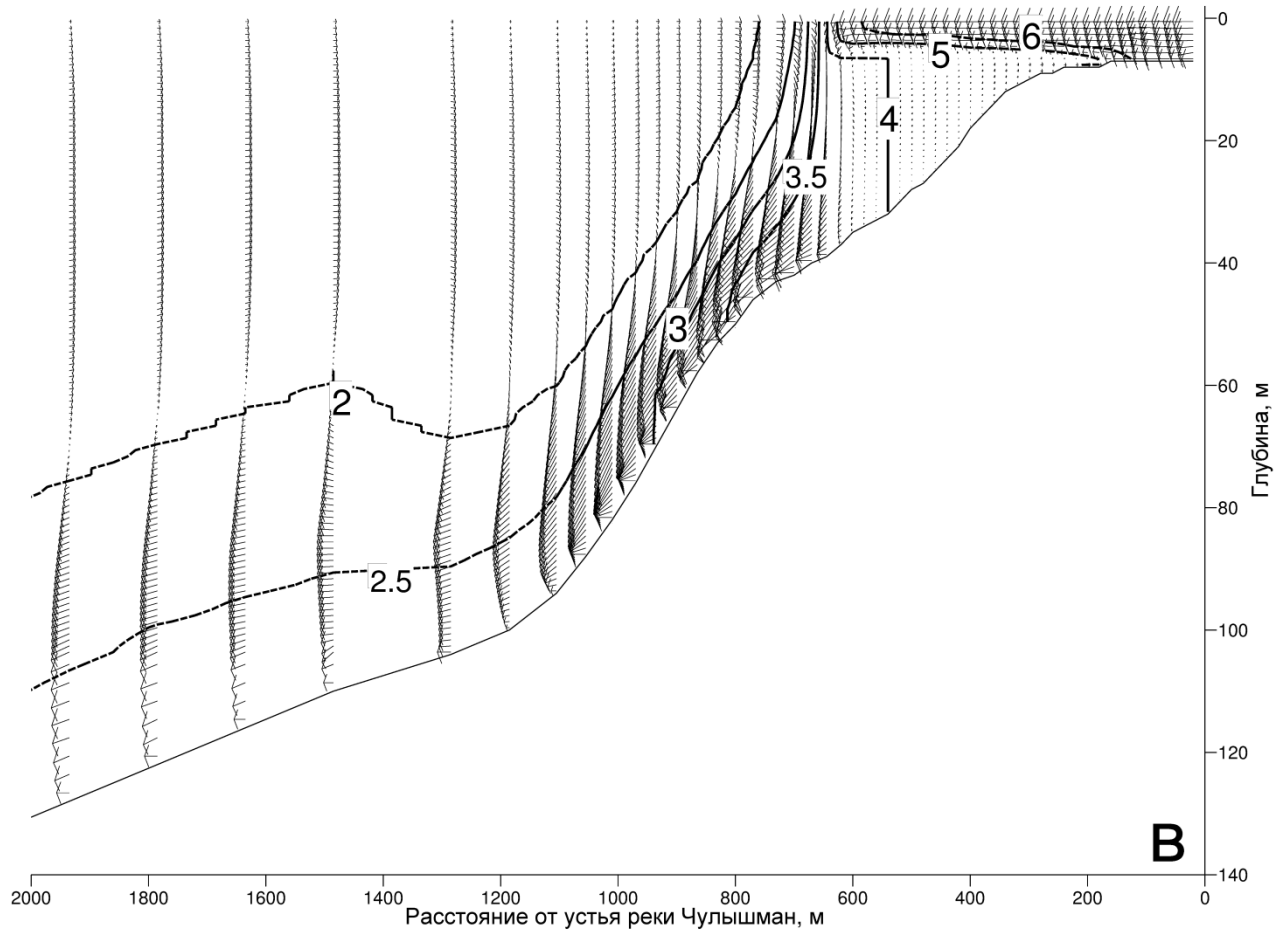


Рисунок 3.2 – Поля температуры воды и векторные отображения течений, полученные в численном эксперименте I.1 для сравнения с типами циркуляции гипотетической схемы Кармака [97]. Фрагмент а – 10.04, б – 26.04, в – 20.05, г – 5.06

Как в схеме Кармака, так и по результатам расчетов ЧЭ I.1 (рис. 3.2 а), вода речного притока при температуре близкой к  $0^{\circ}\text{C}$  имеет меньшую плотность, чем плотность воды в озере и, как результат, она перемещается вдоль озера в виде поверхностного течения. При прогреве воды Чулышмана от  $2$  до  $4^{\circ}\text{C}$  (см. табл. 2.2) речная вода начинает опускаться вдоль предустьевого склона котловины озера в виде плотностной склоновой струи, что отображено на фрагменте б рис. 1.3 и, соответственно, на рис. 3.2 б.

При дальнейшем нагревании плотность речной воды уменьшается и при  $T_{\text{Чул}} = 6^{\circ}\text{C}$  её плотность становится близкой к плотности воды озера. В такой ситуации в пограничной зоне между озерной и речной водами проявляется кабелинг-неустойчивость [97, 98], так как общая смесь речной и озерной воды оказывается более плотной, чем любая из ее компонентов. Структура полей скорости течения и температуры воды образующегося при этом речного термического бара (РТБ) хорошо видна на рис. 3.2 в, который качественно идентичен рис. 1.3 с. Детальная структура полей горизонтальной (ось  $x$  направлена справа налево) и вертикальной (ось  $z$  направлена вниз) скоростей течения в области РТБ на 20.05 отображена на фрагментах а и б рис. 3.3. На рис. 3.3 а в поверхностном слое воды хорошо видна зона конвергенции горизонтальных поверхностных течений, которая локально примыкает к изолинии  $T_{md}$  (см. рис. 3.2 в). Опускание воды внутри узкой фронтальной зоны фиксируется на рис. 3.3 б в виде «ядра» максимальных вертикальных скоростей, расположенного на расстоянии 620 м от устья реки Чулышман и смыкающегося с придонной областью нисходящего течения, распространяющегося вниз по склону от основания фронтальной зоны в виде плотностной склоновой струи.

При дальнейшем росте температуры речной воды до  $T_{\text{Чул}} = 8^{\circ}\text{C}$  и резко возросшем расходе воды на г/п Балыкча в период пика весенне-летнего половодья вода притока оказывается меньшей плотности, чем озерная вода, и она проникает в озеро в виде течения, распластанного по поверхности водоема (рис. 3.2 г). В связи с этим, как и в схеме Кармака (фрагмент d рис. 1.3), так и по результатам расчетов ЧЭ I.1 (рис. 3.2 г) на этой стадии реализуются два различных процесса. Первый из них связан с поступлением в поверхностный слой озера речной воды при температуре  $6-8^{\circ}\text{C}$  и представляет собой процесс, происходящий в условиях статической устойчивости, который сдерживает вертикальное перемешивание. Второй процесс в диапазоне температур  $2-6^{\circ}\text{C}$  – это процесс, происходящий в условиях кабелинг-неустойчивости, который усиливает вертикальное перемешивание на фронте речного термического бара.

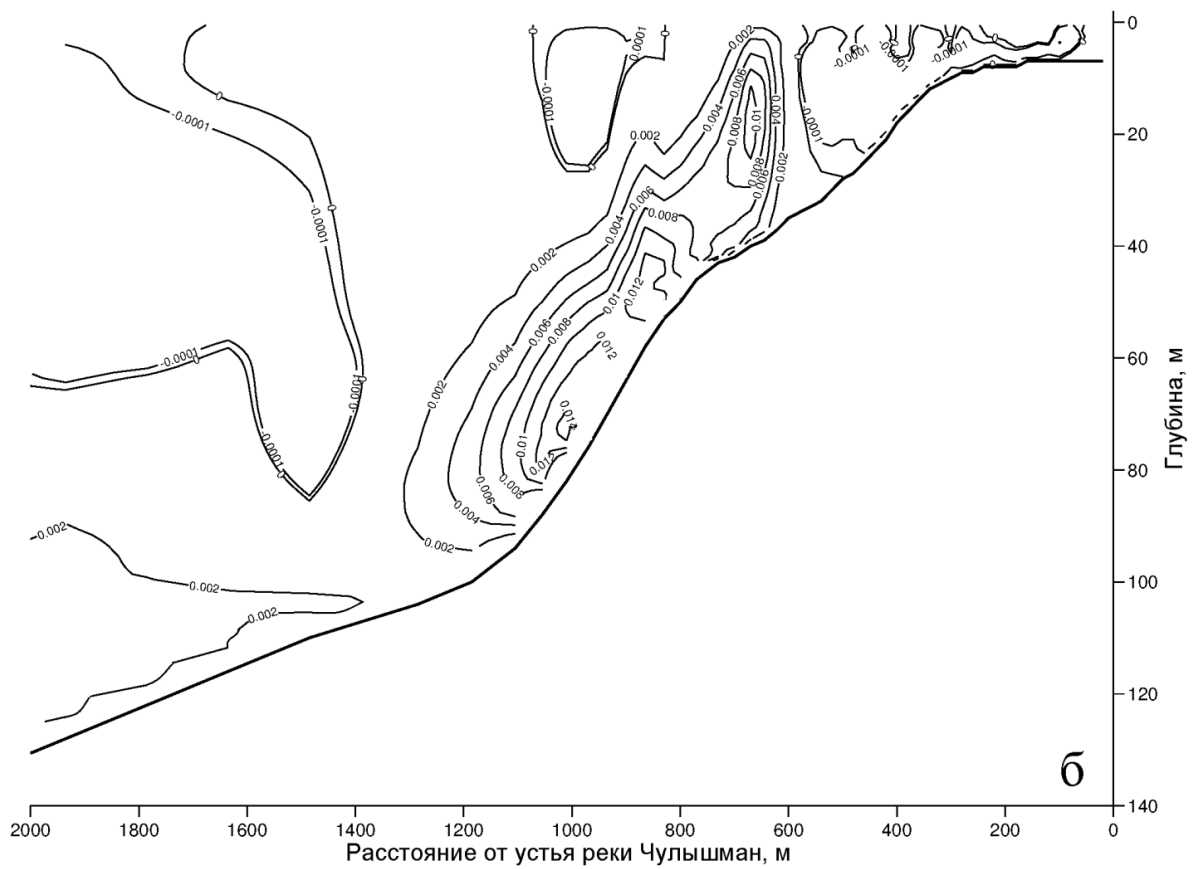
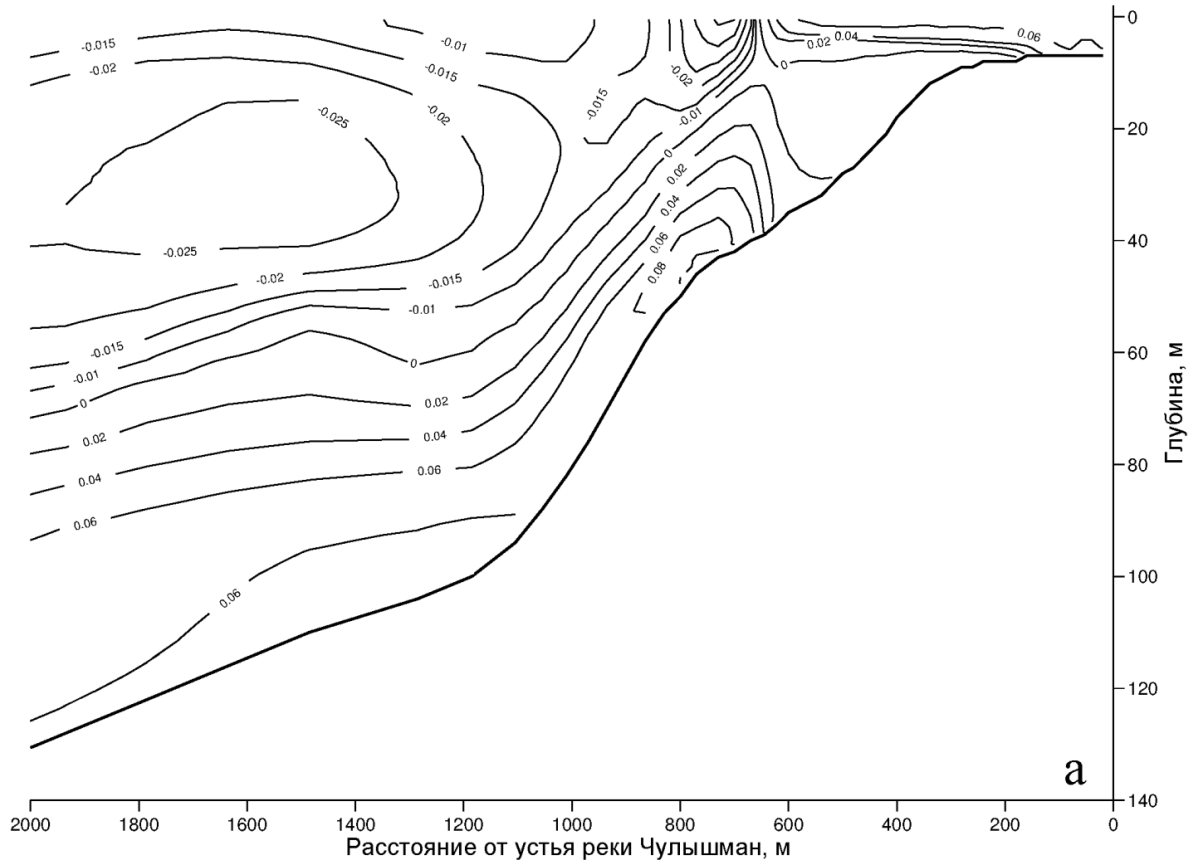


Рисунок 3.3 – Поля горизонтальной (а) и вертикальной (б) скоростей течения (м/с) на 20.05 в ЧЭ I.1.

Различные пути и, соответственно, механизмы проникновения речных вод Чулышмана на участок озера Br5, воспроизводимые в ЧЭ I.1, хорошо видны на рис. 3.4. На этом рисунке изображена временная изменчивость вертикального распределения концентраций трассера ( $T_r$ ) в сегменте 83, расположенном на расстоянии 700 м от начала участка Br5. Отметим, что граничные значения концентраций  $T_r$  на г/п Балыкча во всех ЧЭ, включенных в табл. 2.1, задаются постоянными и равными 100 усл. ед., начальные значения  $T_r$  в WB1 – WB4 принимаются равными нулю.

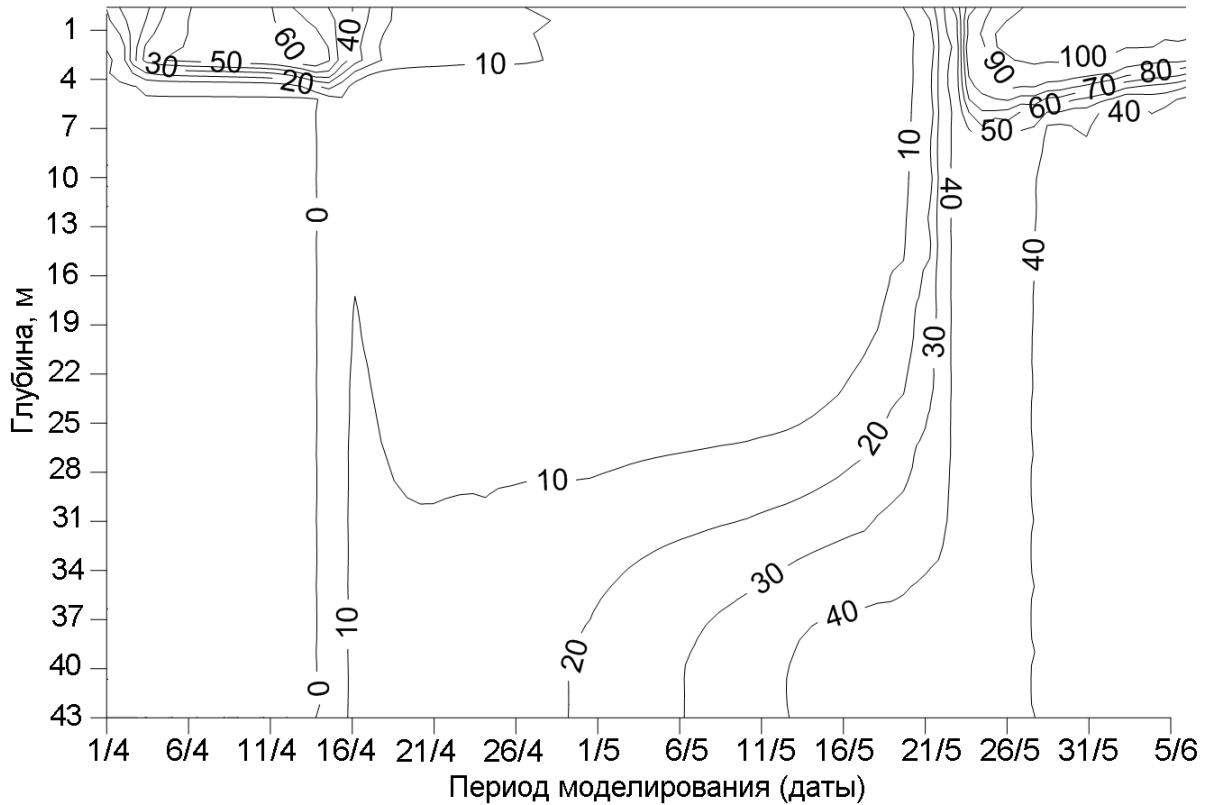


Рисунок 3.4 – Временная изменчивость вертикального распределения концентраций трассера (усл. ед.) в сегменте 83, ЧЭ I.1

Достоинством рис. 3.4 является легкость интерпретации его содержимого. Так область локального максимума  $T_r$ , фиксируемая в поверхностном слое глубиной до 4 м в период с 01.04 по 21.04, генерируется за счет поступления трассера с речными водами при малых значениях  $T_{chl}$  (см. интерпретацию фрагмента а рис 3.2). Увеличение концентрации  $T_r$  от 0 до 40 усл. ед. в придонном слое в период с 14.04 по 13.05 обусловлено переносом трассера склоновым плотностным течением, показанным на фрагменте б рис. 3.2. Прохождение РТБ через «столб воды» сегмента 83 в период с 22.05 по 27.05 отмечается резким нарастанием концентраций  $T_r$  от поверхности озера до глубин 7–8 м и формированием в нижерасположенном слое воды вертикальной «временной полосы» со значениями  $T_r$ , близкими к 40 усл. ед.

Весьма информативной характеристикой динамики распространения фронта РТБ является кривая, соединяющая местоположения фронта РТБ (точки с  $T_L = T_{md}$ ) на поверхности водоема в последовательно фиксированные моменты времени периода моделирования. Именно такая кривая пространственно-временной изменчивости среднесуточного положения фронта РТБ, построенная по результатам ЧЭ I.1, показана на рис. 3.5 как кривая 1. Кривые 2 и 3 на рис. 3.5, построенные по результатам расчетов в ЧЭ I.2 и I.3, позволяют провести количественную оценку скорости перемещения фронта РТБ в зависимости от начальной температуры воды озера, т.е. для  $T_L = 1$  и  $3$  °С, соответственно. Судя по кривой 2 рис. 3.5 фронт РТБ в ЧЭ I.2, от момента возникновения (26.04) до конца периода моделирования (5.06), проходит расстояние равное 700 м, при этом средняя скорость его перемещения составляет 407,5 м/сут. При  $T_L = 2$  и  $3$  °С, пройденное расстояние и скорости перемещения фронта РТБ увеличиваются и составляют 820 м и 506,3 м/сут в ЧЭ II.1, 1080 м и 672,9 м/сут в ЧЭ II.3, соответственно. Кривая 4 на рис. 3.5 построена по результатам дополнительного (не включенного в табл. 2.1) численного эксперимента при начальном значении  $T_L = 2$  °С и с включением модуля «теплообмен» метеорологического форсинга. Кривая скорости перемещения фронта РТБ в этом ЧЭ близка к кривой 3, что позволяет сделать вывод о весьма существенном влиянии теплообмена на поверхности раздела «вода – воздух» на динамику распространения РТБ от устья реки в меридиональном направлении.

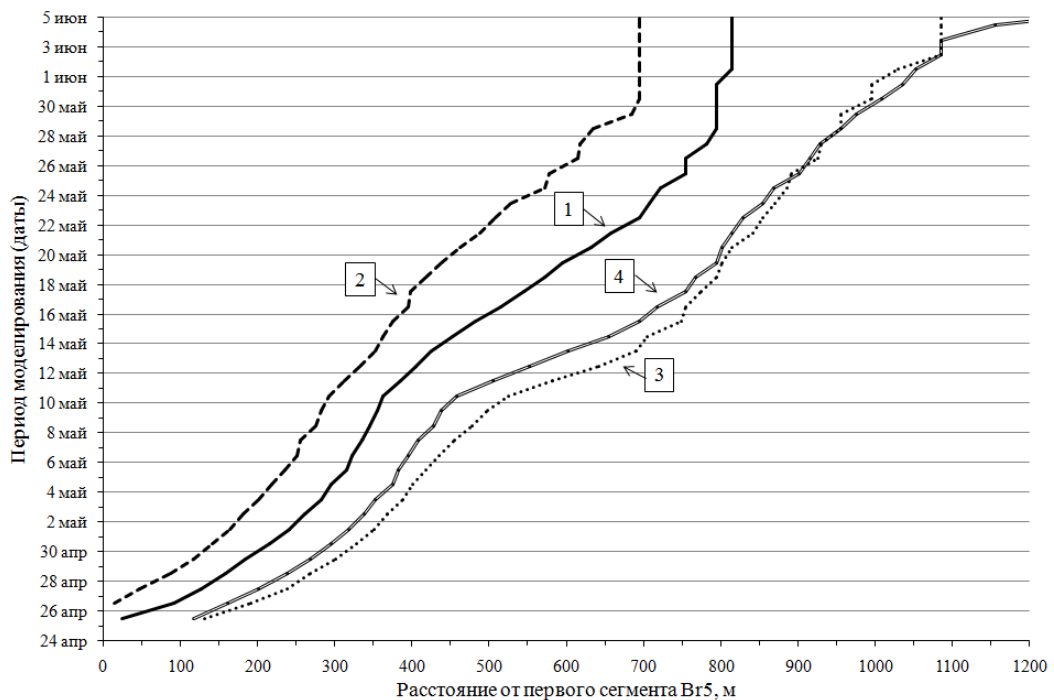


Рисунок 3.5 – Пространственно-временная изменчивость среднесуточного положения фронта РТБ, построенная по результатам ЧЭ I.1 (кривая 1), ЧЭ I.2 (кривая 2), ЧЭ I.3 (кривая 3) и ЧЭ I.1 с включенным теплообменом (кривая 4)

Следует отметить, что качественная картина формирования основных типов циркуляций и особенностей термического режима при проникновении быстро прогреваемых речных вод в период половодья, полученная в ЧЭ I.1 (см. рис. 3.2), сохраняется в ЧЭ I.2 и I.3 при начальных значениях  $T_L = 1$  и  $3$  °С, соответственно. Однако, в ЧЭ I.4 при «экстремальном» начальном значении  $T_L = T_{md} = 4$  °С и отключенном метеорологическом внешнем воздействии картина проникновения весенних речных вод в озеро, как и следовало ожидать [97], резко отличается от аналогичных термодинамических событий, воспроизводимых в ЧЭ I.1 – I.3. Анализ результатов расчетов в ЧЭ I.4 показывает, что в течение всего периода моделирования речные воды распространяются вдоль озера в виде поверхностного течения. Об этом, в частности, свидетельствует рис. 3.6, на котором показана временная изменчивость вертикального распределения полей температуры воды и горизонтальной скорости течения в сегменте 74, расположенным на расстоянии 500 м от начала участка Br5.

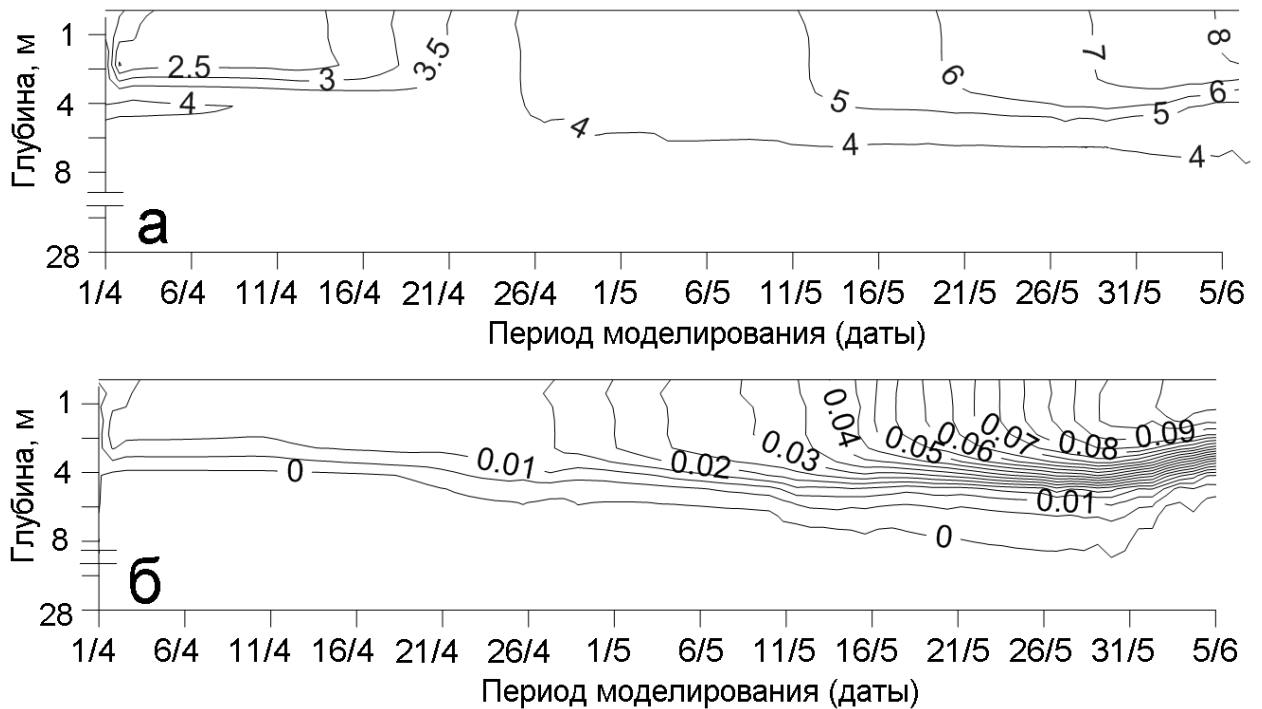


Рисунок 3.6 – Временная изменчивость вертикального распределения полей температуры воды (фрагмент а, °С) и горизонтальной скорости течения (фрагмент б, м/с) в сегменте 74, ЧЭ I.4

Таким образом, результаты анализа численных экспериментов, описанных в данном разделе, позволили изучить процессы проникновения речных вод Чулышмана в Телецкое озеро в период половодья при различных начальных значениях  $T_L = 1, 2, 3$  и  $4$  °С на начало периода весеннего нагревания в меридиональной части озера без учета механизмов внешних атмосферных воздействий.

### 3.2 Результаты моделирования динамики проникновения вод реки Чулышман в Телецкое озеро в период весеннего половодья при реальной начальной температуре водоема и различных сценариях задания параметров сезонного внешнего метеорологического воздействия

Численные эксперименты I.5 – I.8, как уже отмечалось в разделе 2.3, главы 2, можно рассматривать как эксперименты с реальными начальными данными для  $T_L$  южной оконечности Телецкого озера (см. табл. 2.1), отражающими фактические условия наличия обратной стратификации температуры в этой части водоема [64]. Общее представление о динамике проникновения речных вод Чулышмана в меридиональную часть Телецкого озера в ЧЭ I.6 (включены все переменные сезонного внешнего воздействия) дают рис. 3.7 и 3.8. На рис. 3.7 изображены уровни воды, поверхностные температуры и поперечно-осредненные скорости течения воды для транзитной зоны, состоящей из: речного участка – Br3 (WB1), устьевое участка реки Чулышман – Br4 (WB2) и части участка – Br5 (WB3) южной оконечности Телецкого озера непосредственно примыкающей к устью реки, на 12 часов дня 10.04 (фрагмент а), 26.04 (б) и 30.05 (в).

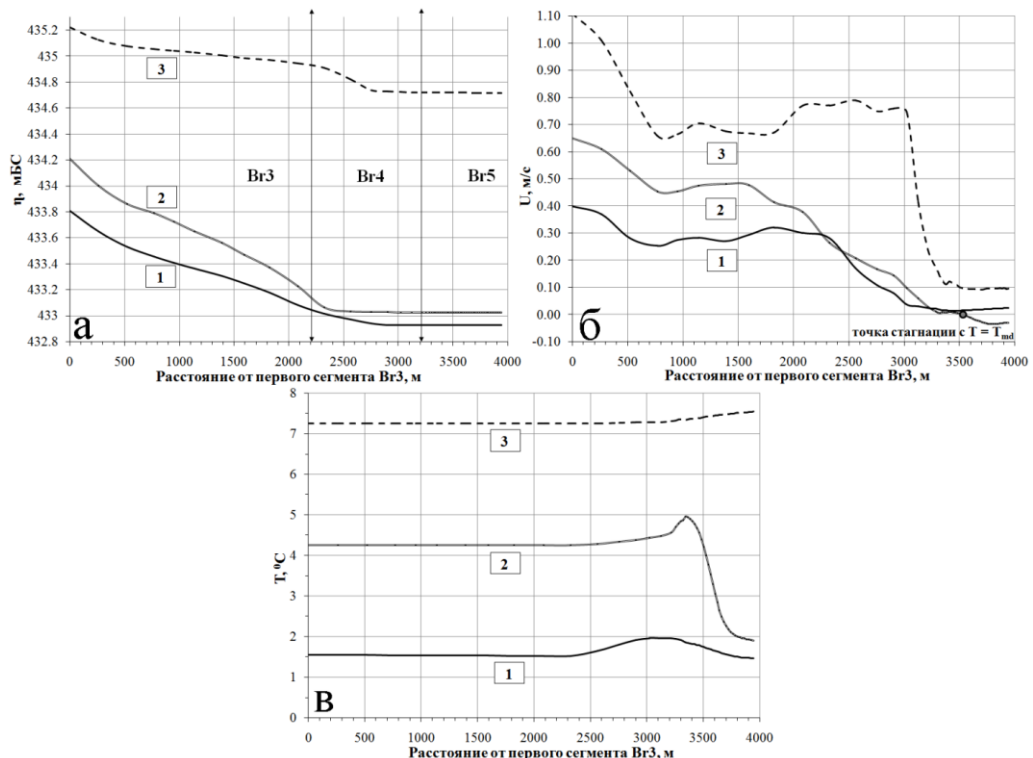


Рисунок 3.7 – Уровни воды (фрагмент а), поперечно-осредненные скорости течения воды (б) и поверхностные температуры (в) для транзитной зоны, состоящей из: речного участка (Br3), устьевое участка реки Чулышман (Br4) и части участка (Br5) южной оконечности Телецкого озера непосредственно примыкающей к устью реки, на 12 часов дня 10.04 (кривые 1), 26.04 (кривые 2) и 30.05 (кривые 3) в ЧЭ I.6

Провести детальное сравнение изменчивости рассчитанных значений  $\eta$  и  $U$  вдоль участка реки Чулышман с натурными данными невозможно, поскольку отсутствуют данные



гидрологических наблюдений между г/п Балыкча и устьем реки. Однако наш опыт верификации модели W2, полученный в работах [54–56, 59], позволяет с определенной уверенностью говорить о том, что ИВК «Телецкое озеро» качественно верно описывает динамику смены фаз гидрологического режима устьевое участка реки Чулышман при сезонном внешнем гидрологическом воздействии. Так в конце периода зимней межени (рис. 3.7, кривые 1) расход реки Чулышман составляет  $15,3 \text{ м}^3/\text{с}$  при среднем значении  $U$  на участке реки от г/п Балыкча до устья равными  $0,33 \text{ м/с}$ . В это время наблюдаются наиболее низкие значения уровня воды Телецкого озера, равные  $432,92 \text{ мБС}$  [64]. В начале периода весеннего половодья (рис. 3.7, кривые 2) расход реки составляет  $74,2 \text{ м}^3/\text{с}$ , при этом температура воды речного участка уже достигает значения выше  $T_{md}$ , а среднее значение  $U$  увеличивается до  $0,53 \text{ м/с}$ . В этот период в Br5 начинает формироваться РТБ, что подтверждается наличием конвергенции горизонтальных поверхностных течений (точка стагнации, кривая 2 рис. 3.7 б). В пик весеннего половодья (рис. 3.7, кривые 3) при резко возросшем расходе реки Чулышман до  $860,8 \text{ м}^3/\text{с}$  и увеличении среднего значения  $U$  до  $0,92 \text{ м/с}$  наблюдается подъем уровней как речного участка Br3 ( $435,22 \text{ мБС}$ ), так и озерного Br5 ( $434,75 \text{ мБС}$ ). Это полностью согласуется с результатами концептуальных представлений работы [64]. Следует отметить, что хорошо выраженный локальный максимум температуры воды (см. кривую 2 на рис. 3.7 в), фиксируемый в 12 часа дня 26.04, обусловлен радиационно-объемным нагреванием столба воды на мелководной части Br5 и совпадает с зоной пониженных, почти нулевых, скоростей течения.

Результаты расчетов ЧЭ I.6 для участка Br5 на 26.04 (фрагмент а), 20.05 (б) и 05.06 (в), когда значения температура воды на входном сегменте участка достигали значений  $4,5$ ,  $6,5$  и  $8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , соответственно, показаны на рис. 3.8 в виде полей температуры и векторного представления течений.

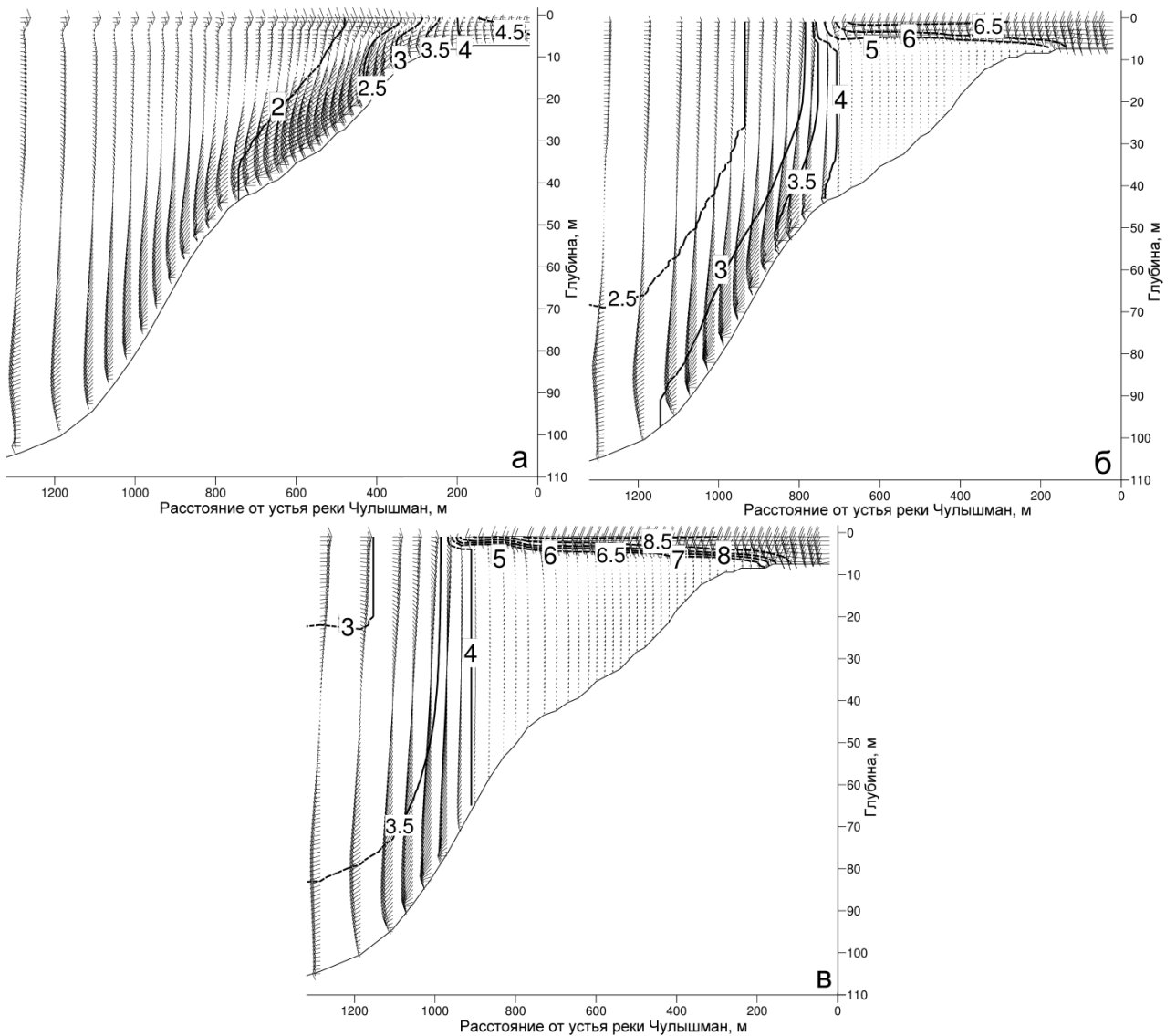


Рисунок 3.8 – Поля температуры воды и векторные отображения течений, полученные в численном эксперименте I.6. Фрагмент а– 26.04, б– 20.05, в– 5.06

Как в феноменологической модели Кармака [98], так и по результатам расчетов ЧЭ I.6 речные воды основного притока, прогреваемые в диапазоне от  $0,7$  до  $4$   $^{\circ}\text{C}$ , опускаются ко дну озера вдоль склона котловины водоема, примыкающей к устью реки, образуя при этом плотностную склоновую струю (стадия F – «ранняя весна», см. рис. 9а [98] и рис. 3.8а). Дальнейшее нагревание речных вод выше  $4$   $^{\circ}\text{C}$  приводит к формированию речного термического бара вблизи границы «озеро-река» с продолжающимся опусканием «тяжелой» смеси речной и озерной воды ко дну водоема вдоль приустьевоего склона, что соответствует стадии G («середина весны», см. рис. 9б [98]) феноменологической модели Кармака и отображено на рис. 3.8 б. В конце мая и начале июня происходит быстрое нарастание прямого радиационно-объемного нагревания верхних слоев озера, в результате чего температура озерной воды увеличивается, способствуя ускоренному перемещению фронта РТБ вдоль озера в меридиональном направлении. Вследствие этого, теплая речная вода

вблизи устья реки деблокируется и начинает распространяться в поверхностных слоях озера (см. рис. 3.8 в). При этом на участке 200-800 м от устья реки Чулышман на глубинах 8-10 м формируется легко распознаваемый термоклин, фиксируемый на вертикальных профилях  $T_L$  измерительной системы, описанной в [97]. Таким образом, особенности циркуляции и термического режима стадии Н («поздняя весна», см. рис. 9с [98]) феноменологической модели Кармака качественно верно воспроизводятся в ЧЭ I.6, о чем свидетельствует рис. 3.8 в.

На рис. 3.9 показаны кривые пространственно-временной динамики перемещения фронта РТБ на поверхности озера при различных сценариях задания переменных внешних метеорологических воздействий.

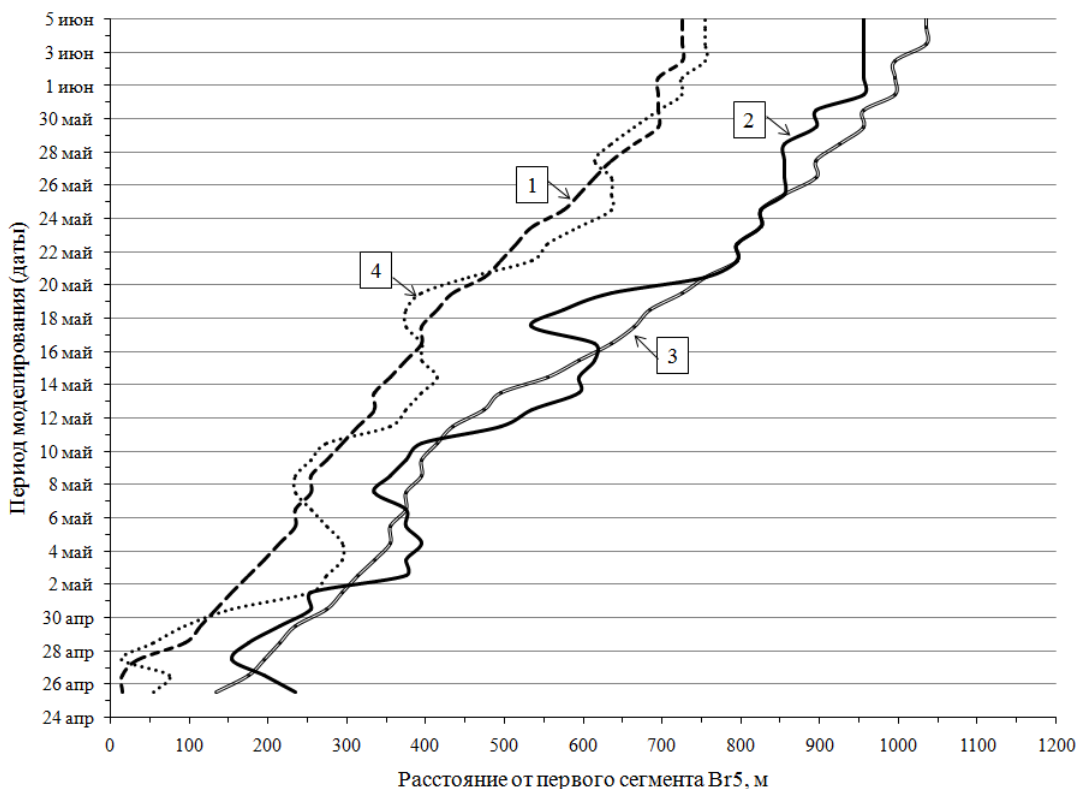


Рисунок 3.9 – Пространственно-временная изменчивость среднесуточного положения фронта РТБ, построенная по результатам ЧЭ I.5 (кривая 1), ЧЭ I.6 (кривая 2), ЧЭ I.7 (кривая 3) и ЧЭ I.8 (кривая 4)

Кривая 1, построенная по результатам расчетов ЧЭ I.5 (теплообмен не учитывается, воздействие ветра отключено) позволяет проанализировать скорость перемещения фронта РТБ, которая зависит только от переменных гидрологических внешних воздействий и начальной температуры озера ( $T_L = 0,8$  °С на поверхности и  $\gamma_L = 0,85$  °С / 100 м от поверхности до дна). Следует отметить, что кривая скорости перемещения фронта РТБ в этом ЧЭ близка к кривой 2, изображенной на рис. 3.5 (ЧЭ I.2), которая получена в случае, когда начальная температура озера задавалась постоянной и равнялась 1 °С. Кривая 2 на рис. 3.9, построенная по результатам ЧЭ I.6, позволяет проанализировать динамику перемещения

весеннего РТБ, генерируемого притоком воды р. Чулышман, процессами теплообмена на поверхности раздела «вода – воздух» с учетом ветрового воздействия. Кривая 4 на рис. 3.9 показывает, что при отключении теплообмена, т.е. при учете только ветрового воздействия в метеорологическом форсинге (ЧЭ I.8), распределение скоростей перемещения фронта РТБ до 26 мая существенно зависит от дрейфовых течений, вызванных «верховками» (см., например, кривую 4 на участке от 30.04 до 6.05), либо «низовками» (см., например, кривую 4 на участке от 7.05 до 11.05). Хотя средние значения скоростей перемещение фронта за весь период моделирования в ЧЭ I.8 близки к кривой 1 (ЧЭ I.6). После 20 мая влияние ветра на перемещение фронта РТБ ослабевает за счет возрастания глубин. Так, например, 28 мая в ЧЭ I.8 (кривая 4) фронт находится на расстоянии 635 м от первого сегмента Вг5, при глубинах около 40 м.

Сравнение кривой 3, построенной по результатам расчетов ЧЭ I.7, и кривой 1, построенной по результатам расчетов ЧЭ I.5, позволяет провести количественные оценки влияния теплообмена на динамику распространения фронта РТБ при отключенном ветровом воздействии. Если 25.04, судя по кривой 3, фронт РТБ в ЧЭ I.7 опережал аналогичный фронт в ЧЭ I.5 на 120 м за счет радиационно-объемного нагрева вод на мелководье WB2, то к 5.06 эта разница увеличивалась до 310 м. Сравнение кривых 2 и 4 позволяет провести количественные оценки влияния теплообмена на динамику распространения фронта РТБ при учете ветрового воздействия. Так средняя разница в «пройденном» расстоянии между фронтами РТБ в ЧЭ I.6 (см. кривую 2, рис. 3.9) и ЧЭ I.8 (см. кривую 4, рис. 3.9) за весь период моделирования составила 200 м. Сопоставление кривых 1 и 3, а также 2 и 4, позволяет сделать общий вывод о весьма существенном влиянии процессов теплообмена на поверхности раздела «вода – воздух» на скорость перемещения фронта РТБ в период весеннего половодья.

В заключение главы отметим, что численные эксперименты I.1 – I.8 позволили достаточно полно исследовать динамику проникновения речных вод Чулышмана в меридиональную часть Телецкого озера при различных вариантах задания параметров начального термического состояния водоема и переменных метеорологических внешних воздействий в период весеннего половодья. Значительную часть результатов, полученных в таком исследовании, можно считать новыми при сравнении с результатами, опубликованными в работах [33–37, 116, 117]. Так, впервые проведенный сопоставительный анализ результатов расчетов ЧЭ I.1 и результатов, представленных в работе [97], позволяет сделать однозначный вывод о феноменологическом подобии типов циркуляции в гипотетической схеме Кармака и воспроизводимых с помощью ИВК «Телецкое озеро». Также новыми являются результаты исследования чувствительности модели W2 к

различным сценариям задания начальной температуры озера (ЧЭ I.1–I.4). Впервые с помощью ИВК «Телецкое озеро» на основе реальных начальных данных о распределении температуры воды в меридиональной части Телецкого озера и устьевом участке реки Чулышман и при различных сценариях задания параметров, описывающих внешние метеорологические и гидрологические воздействия (ЧЭ I.5 – I.8), воспроизведены характерные особенности циркуляции (плотностная склоновая струя и речной термический бар) и термического режима южной части Телецкого озера в период весеннего половодья.

Верификация результатов численных экспериментов I.5 – I.8 проведена преимущественно на основе качественного сравнения результатов расчетов с тремя фазами весеннего нагревания феноменологической модели Кармака [98]. Данные мониторинга вертикальных профилей температуры воды между г/п Балыкча и гидрологическим разрезом м. Кырсай отсутствовали, поэтому количественная верификация результатов расчетов ЧЭ первой тематической группы не проводилась. В связи с этим актуальной является организация специализированных экспедиционных работ, аналогичных работам, описанным в [97–99], для получения данных измерений гидрофизических, гидрохимических и метеорологических переменных высокого пространственно-временного разрешения, характеризующих динамику плотностного термогравитационного склонового течения и речного термического бара, формирующегося над склоном котловины Телецкого озера, примыкающим к устью реки Чулышман. Результаты численных экспериментов этой главы могут быть использованы для обоснования программ таких специализированных экспедиционных работ.

#### **4 Численное исследование термического режима и циркуляций Телецкого озера в периоды весеннего и летнего нагревания при сезонной изменчивости параметров внешних метеорологических и гидрологических воздействий**

В данном разделе описаны результаты второго тематического блока программы численных экспериментов с ИВК «Телецкое озеро» (ЧЭ П.1–П.4). Конкретно в подразделе 4.1 представлены результаты численного исследования механизмов возникновения и перемещения речного и озерного термических баров в меридиональной и широтной частях водоема, и в подразделе 4.2 – результаты численного исследования механизмов возникновения и перемещения термических баров Кыгинского и Камгинского заливов.

Результаты расчетов, описанные в главах 4 и 5, получены для расчетной сетки РС2, когда, в отличие от РС1, Кыгинский залив аппроксимируется как отдельный участок озера – Вг7, примыкающий к участку Вг5 (см. фрагменты б и в рис. 2.5). Основанием для перехода на сетку РС2 послужила верификация результатов расчетов в ЧЭ I.5 – I.8. Именно в результате указанной верификации был установлен факт значительных ошибок в прогнозе скорости перемещения фронта речного термического бара (РТБ) на сетке РС1 после 20.05. За счет существенного занижения указанной скорости при расчетах на сетке РС1 РТБ к концу периода моделирования (05.06) не успевает «дойти» до сегмента 95 РС1, где расположена рейдовая вертикаль 28 – Кыгинский залив (см. рис. 1.1). Однако согласно [64] средняя дата перехода  $T_L$  через  $T_{md}$  на этой вертикали приходится на 30.05.

##### **4.1 Результаты численного исследования механизмов возникновения и перемещения речного и озерного термических баров в меридиональной и широтной частях Телецкого озера**

При анализе результатов численных экспериментов второй тематической группы П.1 – П.4 (см. табл. 2.1) воспользуемся, в качестве феноменологического базиса, следующей классификацией типов термических баров применительно к Телецкому озеру: РТБ – речной термический бар, генерируемый в периоды весеннего нагревания и осеннего охлаждения главным притоком водоема – р. Чулышман; ОТБ – озерный термический бар, генерируемый за счет прогрева/охлаждения вод северо-западного мелководья весной и осенью, соответственно; ТБСП – термические бары смешанной природы, которые генерируются в Камгинском и Кыгинском заливах частично за счет притоков рек Камга и Кыга, частично за счет весеннего прогревания / осеннего охлаждения вод на мелководьях соответствующих заливов и частично за счет проникновения в заливы соответствующих термических баров с

акватории озера. Отметим, что близкая, по сути, классификация весенних термических баров для озера Байкал представлена в работе [30].

Для исследования механизмов возникновения и перемещения РТБ, ОТБ и ТБСП Телецкого озера в период весенне-летнего нагревания при сезонной изменчивости переменных внешних воздействий в численных экспериментах П.1 – П.4, по аналогии с рис. 3.5 и 3.9, были построены кривые пространственно-временных траекторий перемещения фронтов соответствующих термических баров по поверхности озера для меридиональной и широтной частей водоема как единого водного объекта, а также отдельно для Кыгинского и Камгинского заливов. Пример указанных кривых, построенных по результатам ЧЭ П.1 (включены все переменные сезонных внешних воздействий) и ЧЭ П.3 (отключены все составляющие гидрологических внешних воздействий), показан на рис. 4.1. Аналогичный пример кривых, построенных по результатам ЧЭ П.2 (в отличие от П.1 не учитывается ветровое воздействие) и ЧЭ П.4 (в отличие от П.3 также не учитывается ветровое воздействие), показан на рис. 4.2. Общий и важный вывод, который следует из сравнительного анализа кривых 1–4 этих рисунков, заключается в том, что ветровое воздействие на динамику перемещения фронтов термических баров в целом оказывается незначительным и второстепенным по сравнению с воздействием главной компоненты метеорологического внешнего воздействия – радиационно-турбулентного теплообмена на поверхности водоема. Подтверждение этого вывода содержится в главе 5 монографии [64, с. 63], в которой авторы на основе многочисленных наблюдений на Телецком озере утверждают: «Ветровые течения практически не могут разрушить термический бар вследствие того, что в области термического бара существует плотностная циркуляция вод, вызванная только неравномерной температурой воды на различных глубинах».

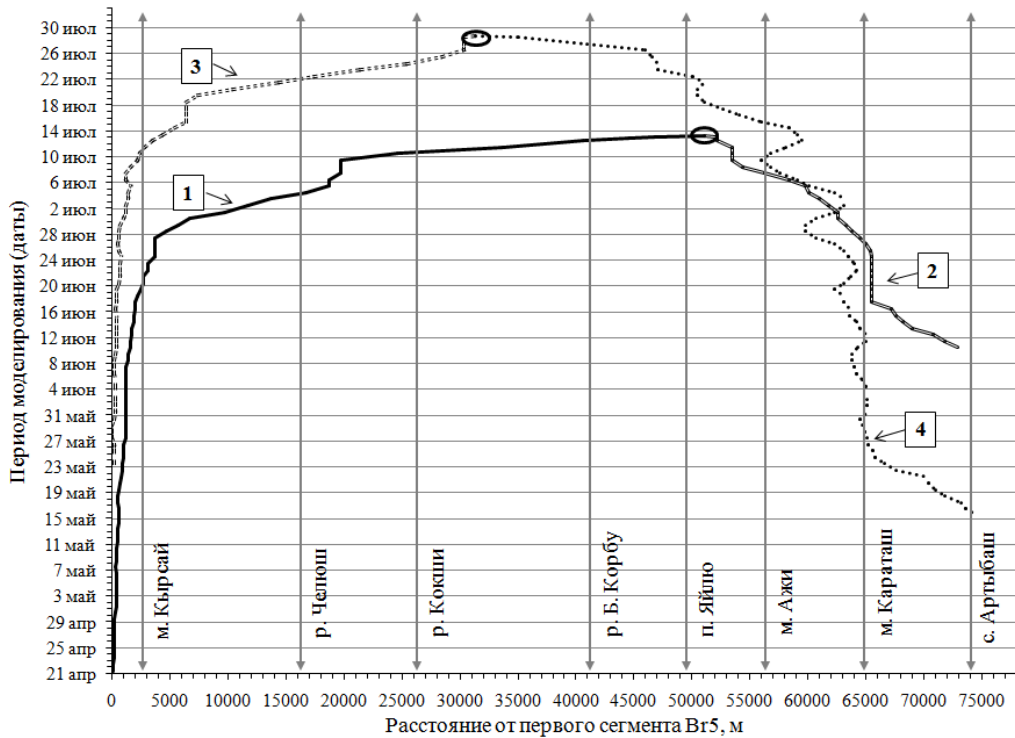


Рисунок 4.1 – Пространственно-временная изменчивость среднесуточного положения фронтов термических баров. Кривая 1 – РТБ и кривая 2 – ОТБ построены по результатам ЧЭ П.1. Кривая 3 – меридиональный ОТБ и кривая 4 – широтный ОТБ построены по результатам ЧЭ П.3. Овалами обозначены места и время слияния соответствующих термических баров

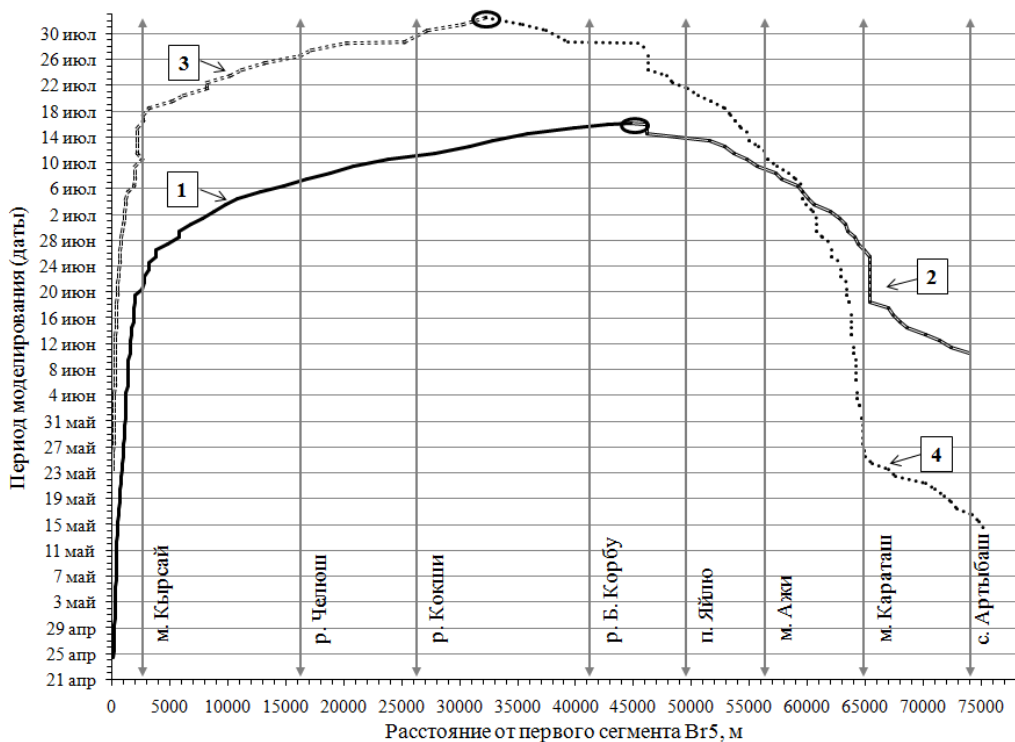


Рисунок 4.2 – Пространственно-временная изменчивость среднесуточного положения фронтов термических баров. Кривая 1 – РТБ и кривая 2 – ОТБ построены по результатам ЧЭ П.2. Кривая 3 – меридиональный ОТБ и кривая 4 – широтный ОТБ построены по результатам ЧЭ П.4. Овалами обозначены места и время слияния соответствующих термических баров



Кривая 1 на рис. 4.1 позволяет проанализировать осредненную динамику перемещения весеннего РТБ, генерируемого притоком воды р. Чулышман, процессами теплообмена на поверхности раздела «вода – воздух» с учетом ветрового воздействия, от момента его возникновения в первом сегменте Вг5 (21.04) до момента слияния этого РТБ (13.07) с ОТБ, возникшим 10.06 в сегменте 312 на северо-западном мелководном участке Вг9 (см. кривую 2 на рис. 4.1). Отметим, что по данным наблюдений за среднесуточным периодом, «к 15 июля фронт смыкается и озеро становится термически однородным» [64]. По результатам расчетов в ЧЭ II.1 смыкание фронтов ОТБ и РТБ наступает 13 июля, а термическая однородность озера в продольном направлении имеет место с 14–15 июля.

Судя по кривой 1 рис. 4.1, фронт РТБ в ЧЭ II.1 проходит через пункт м. Кырсай 20.06, при этом средняя скорость его перемещения в меридиональном направлении на временном интервале 21.04 – 20.06 составляет 44 м/сут. Аналогичные скорости оказываются равными 923 м/сут и 1250 м/сут на участках от пункта м. Кырсай до пункта р. Челюш и от пункта р. Челюш до пункта р. Кокши. Фронт РТБ отмечается в пункте р. Челюш 4.07. Далее фронт РТБ проходит пункты р. Кокши, р. Б. Корбу (меридиональный участок озера) и п. Яйлю (широтный участок) 11.07, 12.07 и 13.07. Скорость перемещения фронта этого термобара на участке от пункта р. Кокши до п. Яйлю составляет значение 5814 м/сут, что свидетельствует о быстром меридионально-широтном продвижении объемов смеси речной (р. Чулышман) и озерной воды, которые идентифицировались по полю концентраций трассера, в условиях интенсивного летнего радиационно-объемного нагревания поверхностного слоя воды в озере.

Полное качественное и количественное представление об основных различиях во временной динамике вертикальных распределений температуры воды и скорости течения дает сравнительный анализ рис. 4.3 (ЧЭ II.1) и 4.4 (ЧЭ II.2). Эти рисунки построены для сегмента 74 (предустьевой склон Вг5) на период с 1.04 по 1.08 «среднего» года. Согласно рис. 4.3 и 4.4 отмечаются следующие даты прохождения через сегмент 74 фронта РТБ: 12.05 в ЧЭ II.1 и 13.05 в ЧЭ II.2. Картина ветрового воздействия (см. рис. 2.8) на динамику вертикальных профилей  $T_L$  и  $U$  представляется понятной и легко интерпретируемой. Существенные различия в этой картине фиксируются после прохождения фронта РТБ через сегмент 74. Это обусловлено, прежде всего, механизмом ветрового воздействия на устойчиво стратифицированный эпилимнион и ниже расположенный металимнион (слой скачка  $T_L$ ), что приводит в ЧЭ II.1 к возникновению после 25.05 внутренних волн с нарастающей по времени амплитудой (см. рис. 4.3). Описанная картина возникновения внутренних волн на слое скачка и роста их амплитуды в результате ветрового воздействия, в целом, соответствует феноменологическим представлениям и результатам наблюдений в работах [64; 99].

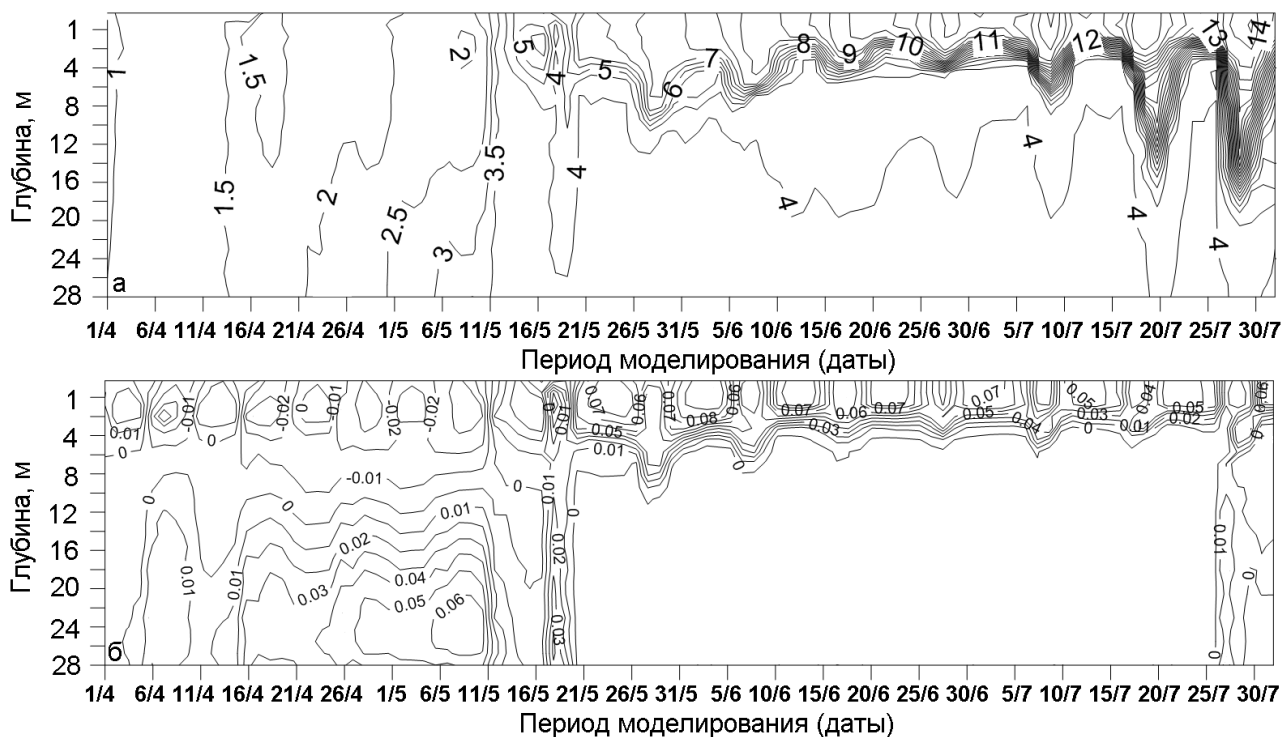


Рисунок 4.3 – Временная изменчивость вертикального распределения полей температуры воды (фрагмент а,  $^{\circ}\text{C}$ ) и горизонтальной скорости течения (фрагмент б, м/с) в сегменте 74, ЧЭ II.1

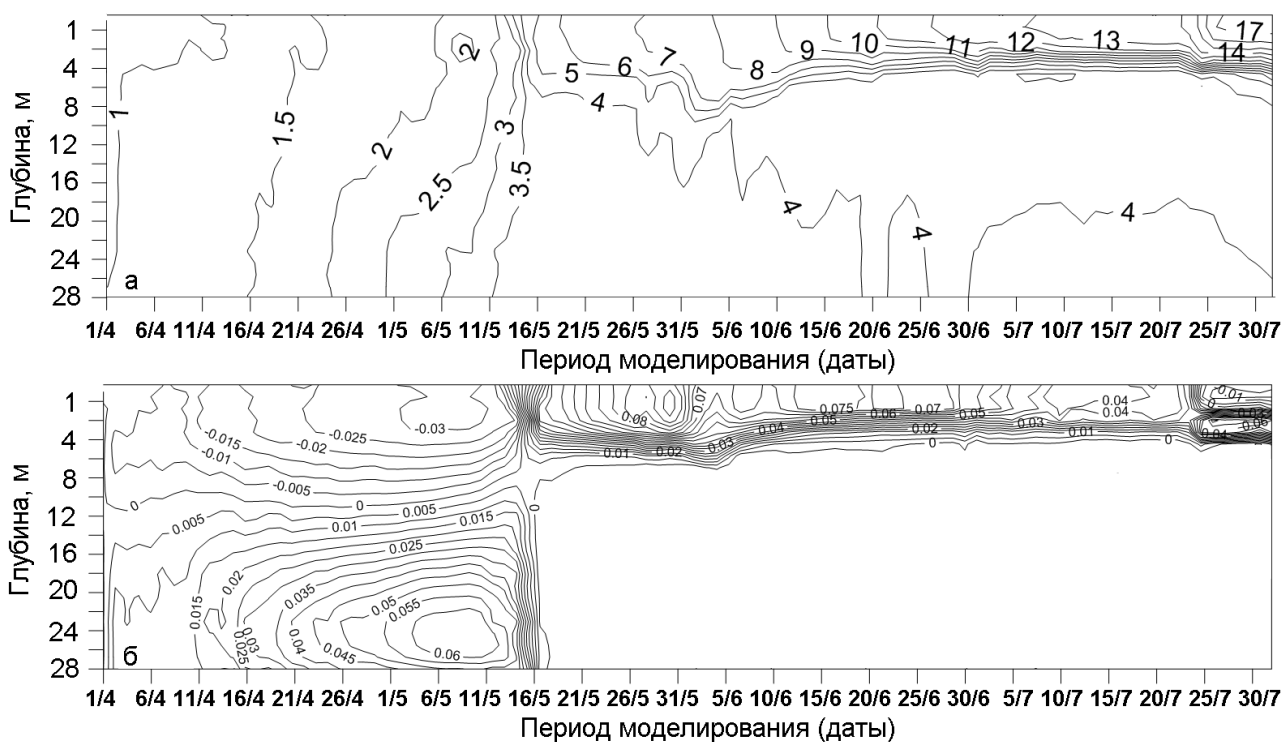


Рисунок 4.4 – Временная изменчивость вертикального распределения полей температуры воды (фрагмент а,  $^{\circ}\text{C}$ ) и горизонтальной скорости течения (фрагмент б, м/с) в сегменте 74, ЧЭ II.2

Описание термодинамических событий на широтном участке озера в период весеннего нагревания начнем с демонстрации кривой на рис. 4.5, отражающей динамику

толщины слоя льда (начальная толщина слоя льда задана равной 0,5 м) на временном интервале с 01.04 по 10.05.

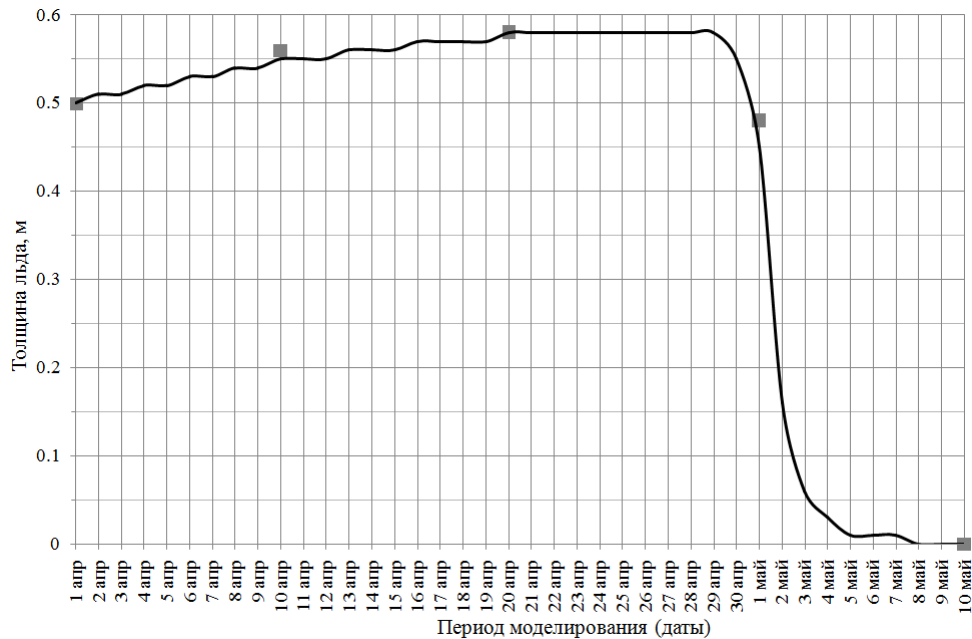


Рисунок 4.5 – Значения толщины льда в широтной части Телецкого озера: сплошная кривая – результат моделирования (ЧЭ II.1), квадраты – результаты измерений, представленные в табл. 51 работы [64]

На этом рисунке наряду с прогностической кривой временной изменчивости толщины льда квадратами показаны среднемноголетние значения толщины льда на 1.04, 10.04, 20.04, 30.04 и 10.05 в широтной части Телецкого озера, заимствованные из табл. 51 работы [64]. Рис. 4.5, как и результаты расчетов характеристик ледового покрова в работе [129], свидетельствует о значительном позитивном потенциале модели W2 по воспроизведению динамики ледового покрова водных объектов.

После таянья льда с 8.05 по 10.06 происходит радиационно-объемное нагревание толщ воды на северо-западном мелководном участке (Br9), которое, как показывает детальный анализ анимаций векторного представления полей течений и поля  $T_L$  в ЧЭ II.1 и ЧЭ II.2, заметно уменьшается за счет переноса относительно холодных вод озера с глубоководного участка Br8 к истоку р. Бия. Формирование устойчивого по времени фронта ОТБ на участке с глубинами 5–10 м (длина участка около 3 км), примыкающим к истоку р. Бии, приходится на 10.06. Затем фронт ОТБ начинает перемещаться в широтном направлении с запада на восток, преодолевая при этом встречное стоковое течение, направленное к истоку р. Бия (см. рис. 4.6). В этот период горизонтальное распределение  $T_L$  в поверхностном слое воды на участке Br9 носит «пятнистый» характер, области максимального прогрева («острова теплой воды») совпадают с зонами пониженных скоростей течения, показанными на рис. 4.6 как маркированные зоны (овалы).

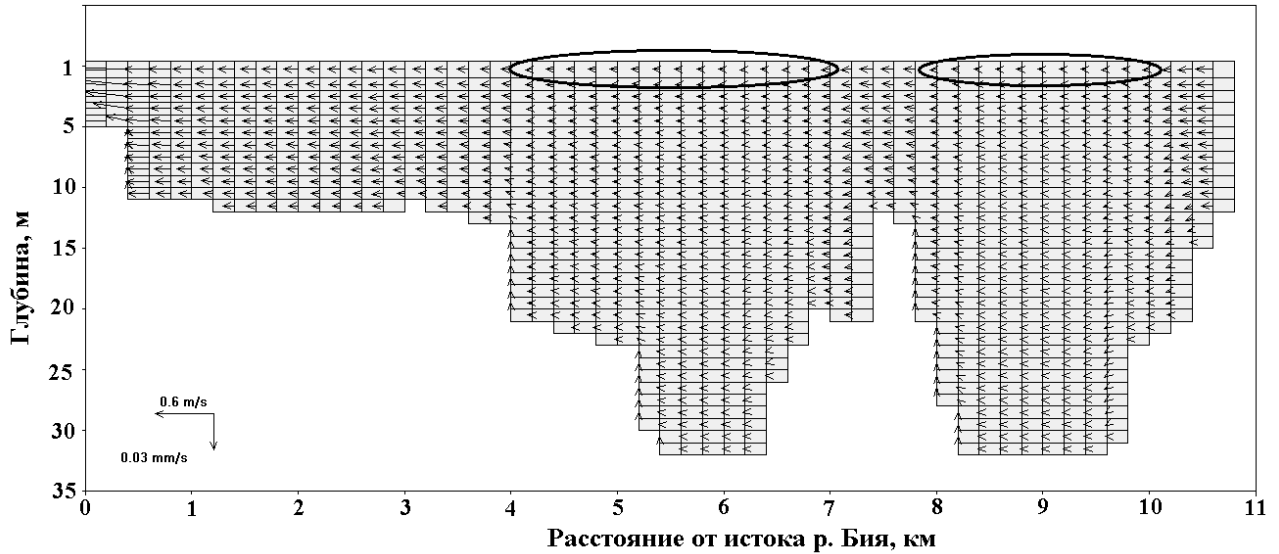


Рисунок 4.6 – Векторное отображение скорости течения на северо-западном мелководном участке Телецкого озера (Br9) на 20.06 среднего года, маркированными зонами обозначены области максимального прогрева поверхностного слоя воды

Фронт весеннего ОТБ достигает пункта с. Артыбаш 10.06, 26.06 – пункта м. Караташ и 7.07 – пункта м. Ажи. С переходом ОТБ с мелководного участка Br9 на глубоководный участок Br8 происходит существенная перестройка полей  $U$  и  $T_L$  в окрестностях фронта ОТБ. Это хорошо видно при сравнении графических отображений соответствующих переменных на рис. 4.7 (согласно верхней части рисунка, дата прохождения фронта ОТБ через сегмент 296, расположенный на расстоянии 5,8 км от истока р. Бия (Br9), приходится на 16.06) и рис. 4.8, на котором представлены горизонтальные распределения  $U$  и  $T_L$  в поверхностном слое воды на 9.07, когда фронт ОТБ находится вблизи пункта м. Ажи (Br8). На рис. 4.8 точка  $T_L = T_{md} = 4,0$  °С (фронт ОТБ) является одновременно местом конвергенции горизонтальных поверхностных течений в зоне фронта ОТБ, характерной для классических озерных термических баров (см. например, [75]). Указанная зона конвергенции не воспроизводится на рис. 4.7, что обусловлено наличием общего восточного переноса водных масс (см. рис. 4.6) к истоку р. Бия на участке Br9.

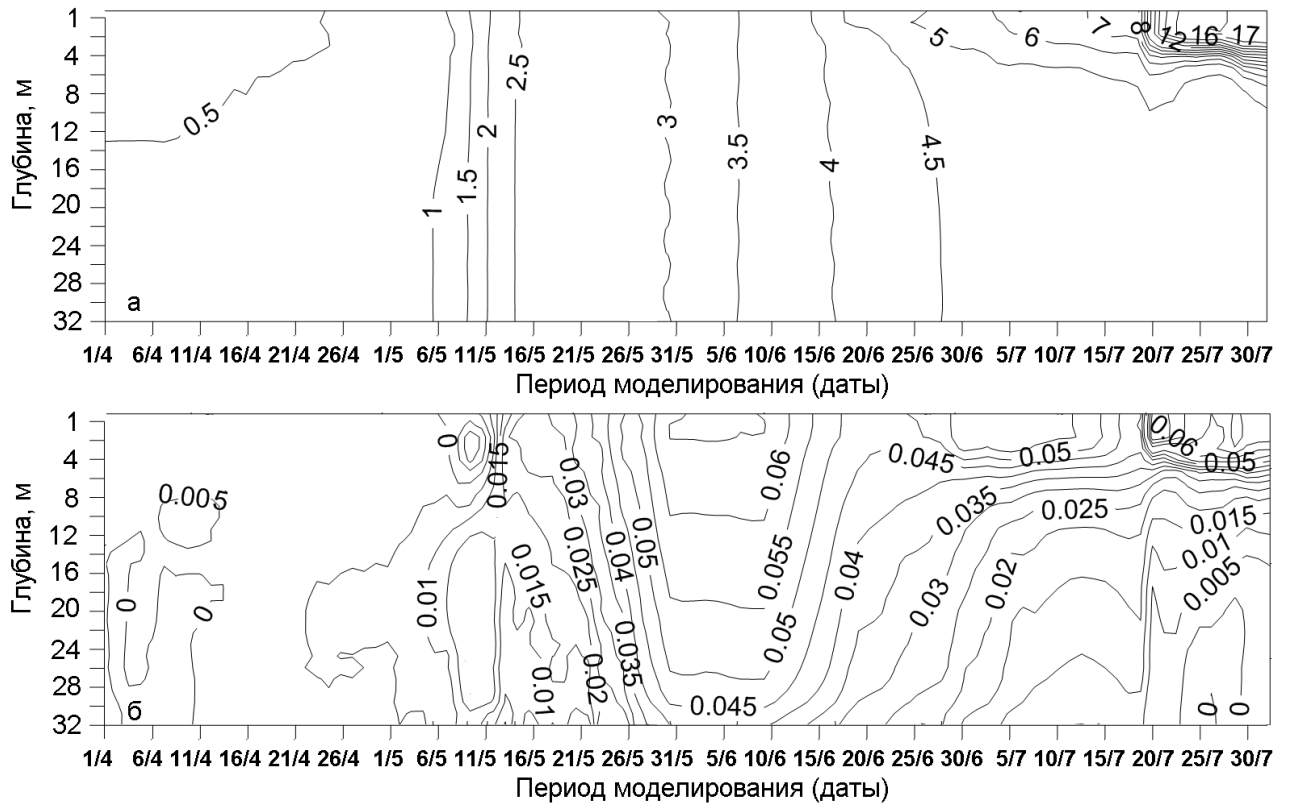


Рисунок 4.7 – Временная изменчивость вертикального распределения полей температуры воды (фрагмент а,  $^{\circ}\text{C}$ ) и горизонтальной скорости течения (фрагмент б, м/с) в сегменте 296, ЧЭ II.2

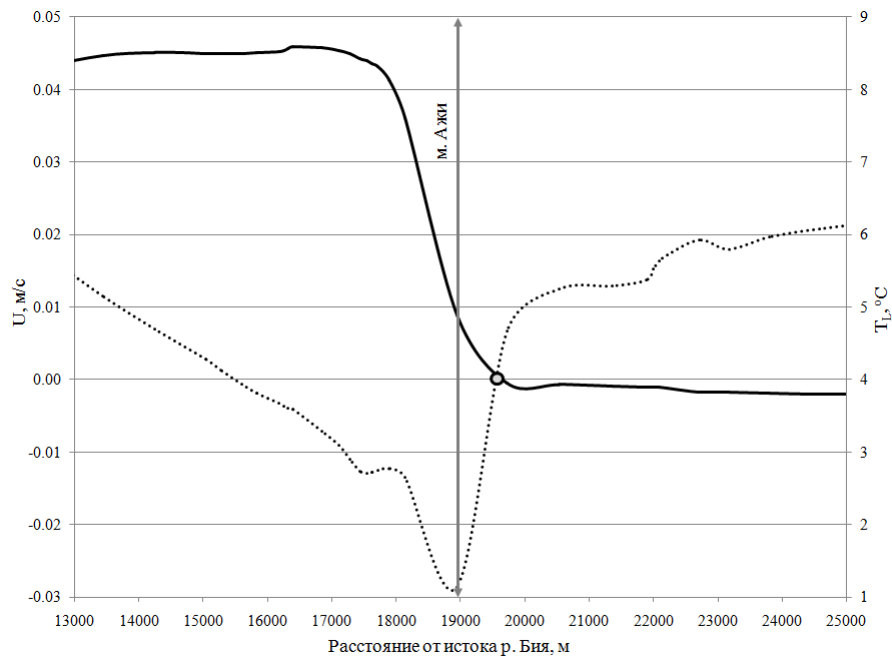


Рисунок 4.8 – Горизонтальные распределения  $U$  (пунктирная линия) и  $T_L$  (сплошная линия) в поверхностном слое воды на 9.07 в ЧЭ II.2 (точка  $T_L = T_{md} = 4,0^{\circ}\text{C}$ )

Слияние ОТБ с движущимся навстречу РТБ, как уже отмечалось выше, происходит 13.07 между пунктами м. Ажи и Яйлю. Средняя скорость перемещения фронта ОТБ на участке от с. Артыбаш до точки слияния составляет 643 м/сут.

Замечательный ресурс прикладного системного анализа и компьютерного моделирования, в частности, заключается в том, что можно задать вопрос «что будет, если?» и получить на него ответ. Возможность использовать этот ресурс в полной мере реализована в численных экспериментах П.3 и П.4. В этих экспериментах воспроизводится гидродинамика и термический режим гипотетического Телецкого озера, «лишенного» всех речных притоков и оттока – р. Бии. Очевидно, что классификационное определение РТБ не понадобится при обсуждении результатов ЧЭ П.3 и П.4 (кривые 3 и 4 на рис. 4.1 и 4.2, соответственно).

Как и следовало ожидать, первым по времени (14.05) в ЧЭ П.3 и П.4 возникает ОТБ на обширном мелководье участка Вг9 (см. кривые 4 на рис. 4.1 и 4.2). Подчеркнем, что это термодинамическое событие начинается на месяц раньше, чем формирование ОТБ в ЧЭ П.1. Как отмечалось выше, причина задержки начала формирования ОТБ в ЧЭ П.1 обусловлена наличием в Вг9 стокового течения относительно холодных озерных вод Вг8, направленного к истоку р. Бия. По мере возникновения фронт ОТБ начинает перемещаться вдоль широтного сектора озера с запада на восток, последовательно проходя пункты: с. Артыбаш (16.05), м. Караташ (27.05), м. Ажи (9.07) и п. Яйлю (23.07). 24.07 этот ОТБ проникает в меридиональный сектор озера, далее проходит пункт р. Б. Корбу (27.07) и 28.07 сливается с ОТБ, сформировавшимся на незначительном по площади мелководье южной оконечности Телецкого озера.

Достаточно полное представление о временной изменчивости вертикальных распределений  $T_L$  и  $U$  в сегменте 296 для ЧЭ П.4 дает рис. 4.9. Сопоставление рис. 4.9 и рис. 4.7 позволяет глубже понять феноменологические различия термодинамических процессов, воспроизводимых в ЧЭ П.4 («гипотетическое озеро») и ЧЭ П.2 («реальное озеро»).

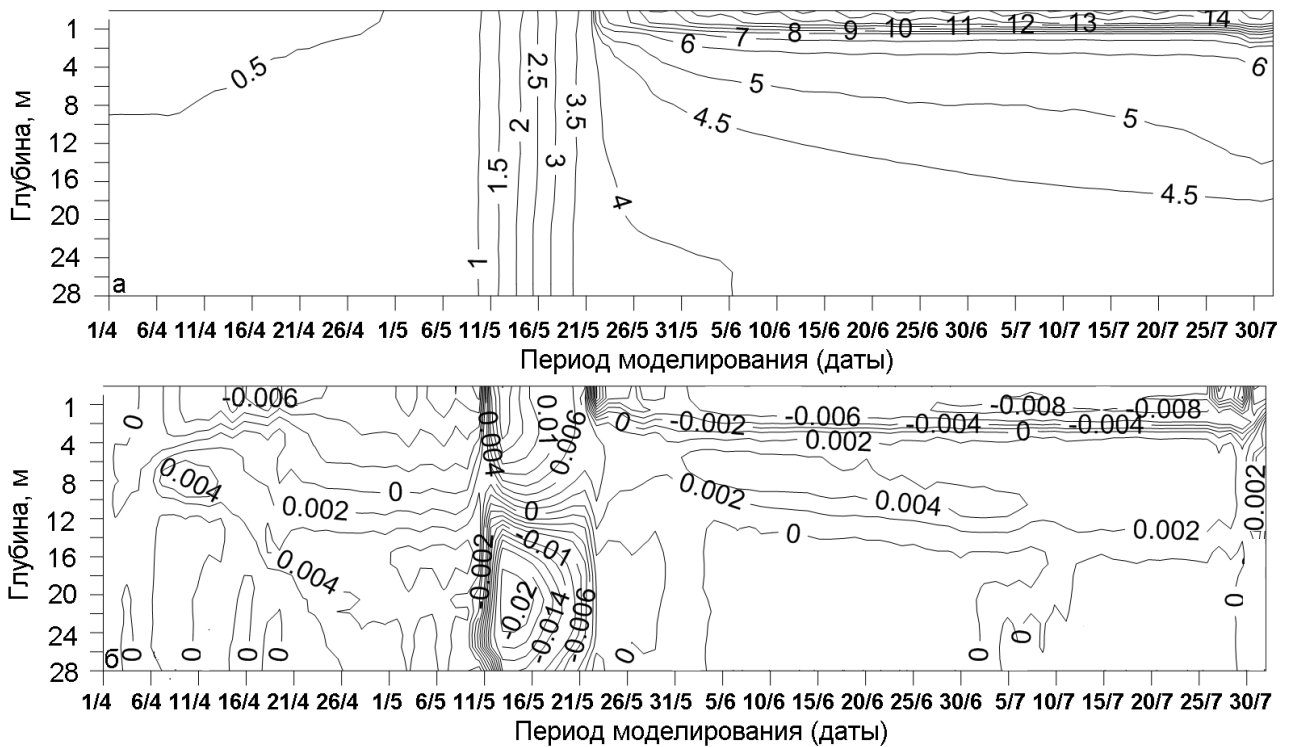


Рисунок 4.9 – Временная изменчивость вертикального распределения полей температуры воды (фрагмент а, °С) и горизонтальной скорости течения (фрагмент б, м/с) в сегменте 296, ЧЭ II.4

В ЧЭ II.3 и II.4 при «отключенном» притоке р. Чулышман (WB1) весенний прогрев озерной воды начинается на мелководном участке Br4 (WB2), длиной 1 км (см. рис. 2.6 и 2.7), и фронт меридионального ОТБ отмечается в первом сегменте Br5 (WB3) 23.05, что на месяц позднее, чем это происходило с РТБ в ЧЭ II.1 и II.2. Далее, 10.07 фронт меридионального ОТБ проходит пункт м. Кырсай при средней скорости перемещения фронта от первого сегмента Br5 до м. Кырсай, равной 53 м/сут. В пункте р. Челюш фронт этого ОТБ отмечается 22.07, средняя скорость перемещения фронта на участке м. Кырсай – р. Челюш равняется 1138 м/сут. Эта скорость возрастает до 2500 м/сут на участке между пунктами р. Челюш и р. Кокши. В пункте р. Кокши фронт меридионального ОТБ отмечается 25.07, после чего 28.07 он сливается с ОТБ, который возник на мелководье Br9.

На рис. 4.10 и 4.11 отображена временная изменчивость вертикального распределения  $T_L$  и  $U$ , полученная в сегменте 74 ЧЭ II.3 и II.4, соответственно.

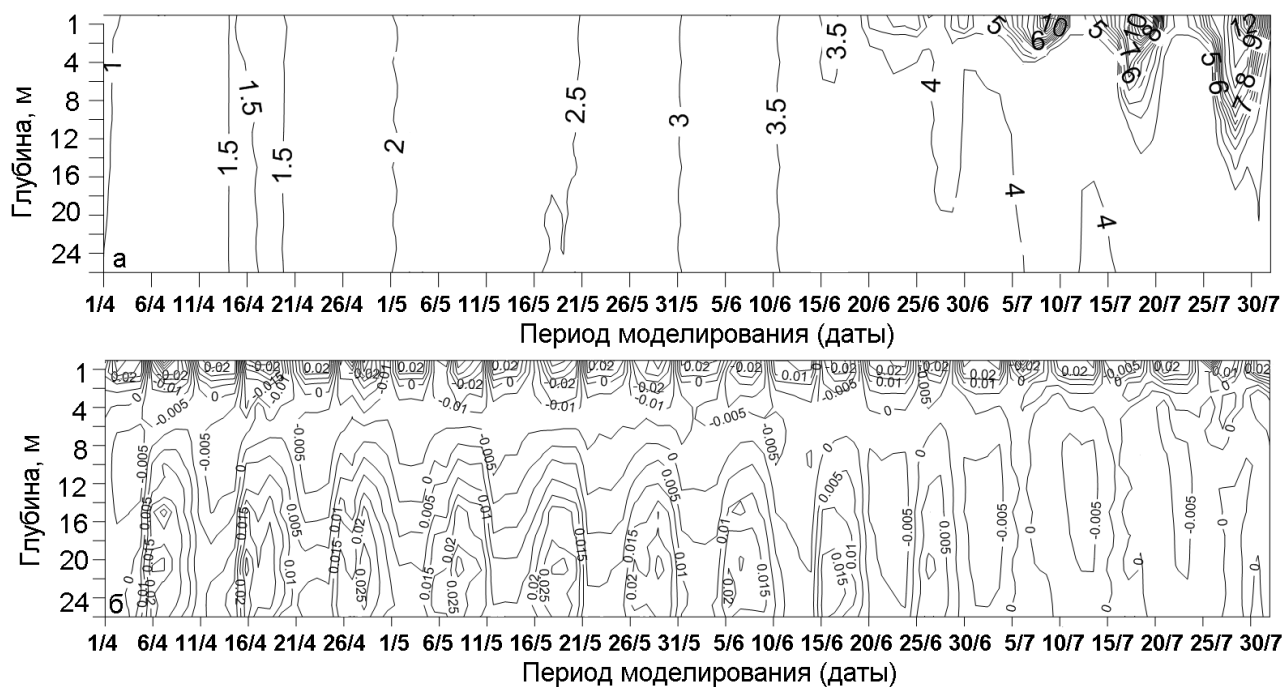


Рисунок 4.10 – Временная изменчивость вертикального распределения полей температуры воды (фрагмент а, °С) и горизонтальной скорости течения (фрагмент б, м/с) в сегменте 74, ЧЭ П.3

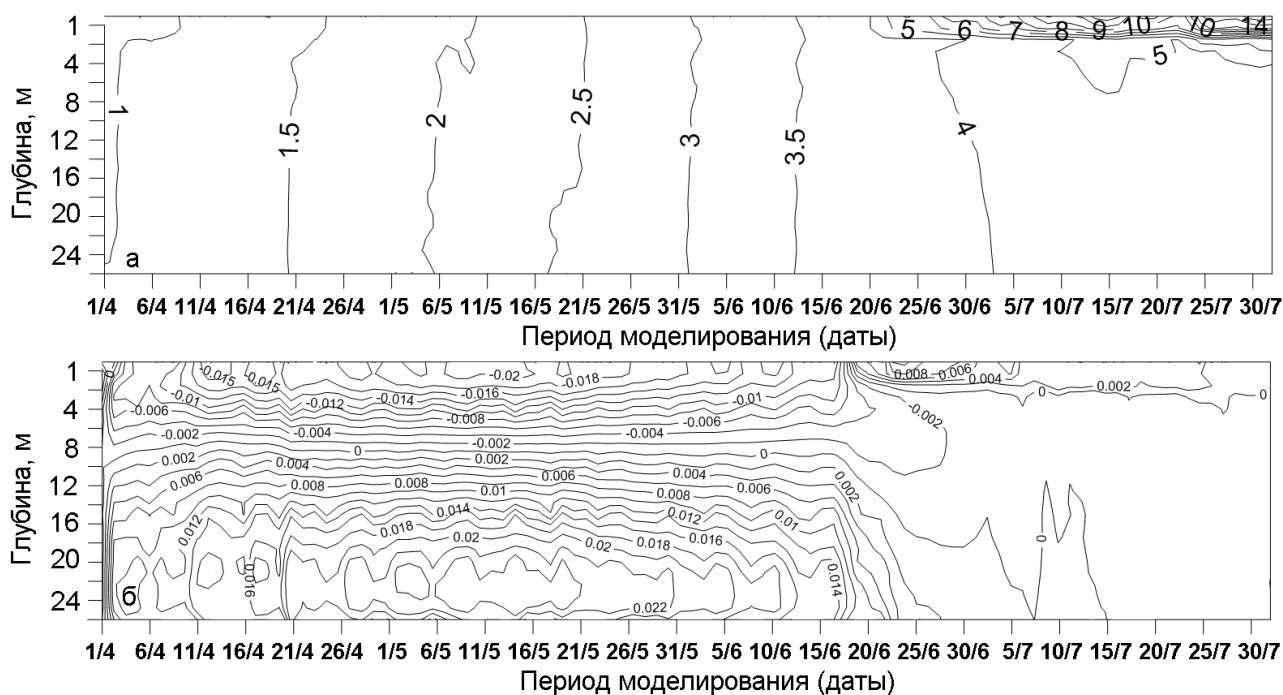


Рисунок 4.11 – Временная изменчивость вертикального распределения полей температуры воды (фрагмент а, °С) и горизонтальной скорости течения (фрагмент б, м/с) в сегменте 74, ЧЭ П.4

Сравнение рис. 4.10 и 4.11 с рис. 4.3 и 4.4 позволяет оценить феноменологические различия термодинамических процессов и циркуляционных структур, воспроизводимых в



ЧЭ II.3–II.4 («гипотетическое озеро») и ЧЭ II.1–II.2 («реальное озеро»), для южной оконечности Телецкого озера.

#### **4.2 Результаты численного исследования механизмов возникновения и перемещения термических баров Кыгинского и Камгинского заливов**

Особый теоретический интерес представляют результаты численного моделирования такого мало изученного экспериментально термодинамического феномена, как возникновение и перемещение локальных термических баров смешенной природы в Кыгинском и Камгинском заливах.

Кыгинский залив является частью участка V (см. рис. 1.1) южной оконечности Телецкого озера. Длина залива – 3 км, средняя ширина около 1,7 км. Средняя и максимальная глубины составляют 60 и 105 м, соответственно. В северной части залива в него впадает река Кыга с площадью водосбора 512 км<sup>2</sup>.

В период весеннего нагревания заметные термодинамические изменения в этом заливе по результатам ЧЭ II.1 начинают фиксироваться в придонных слоях в третьей декаде апреля. Это обусловлено проникновением в придонные слои залива смеси озерной и речной воды реки Чулышман, которая в этот период (фаза «ранняя весна», согласно [98]) начинает опускаться вдоль предустьевого склона котловины озера в виде плотностной склоновой струи. Наглядной иллюстрацией этого механизма является рис. 4.12. На фрагменте а рис. 4.12 показана временная изменчивость вертикального распределения концентраций трассера ( $T_r$ ) в сегменте 203 (гидрологическая вертикаль 28 – Кыгинский залив), расположенном на расстоянии 1,5 км от устья реки Кыга. Увеличение концентрации  $T_r$  с 5 до 25 усл. ед. в придонных слоях залива в период с 25.04 по 20.05 обусловлено именно переносом трассера, поступающим в озера из реки Чулышман. На фрагменте б рис. 4.12 показано  $x$ - $z$  сечение поля  $T_r$  в Кыгинском заливе 30.04 (ЧЭ II.1), на этом сечении ясно прослеживается «язык» смеси озерной и речной воды Чулышмана проникшей в залив как ответвление плотностной склоновой струи Bг5 (см. фрагмент а рис. 3.8).

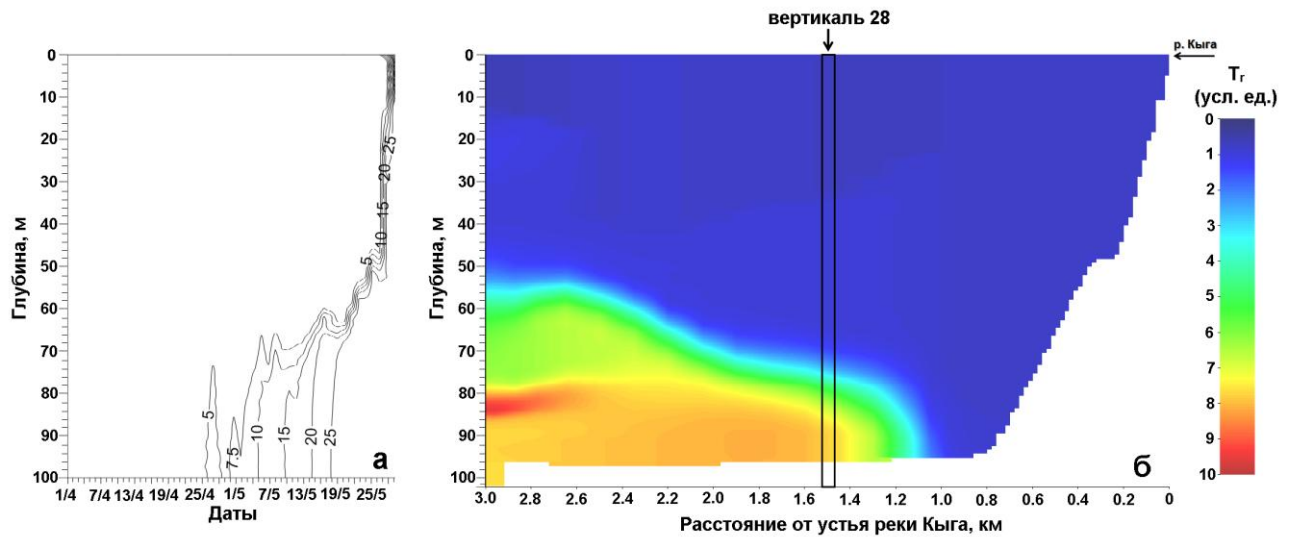


Рисунок 4.12 – а) временная изменчивость вертикального распределения концентраций трассера (усл. ед.) в сегменте 203 (вертикаль 28), ЧЭ II.1; б) поле концентрации трассера 30.04 в ЧЭ II.1, иллюстрирующее проникновение смеси речных вод Чулышмана и озерной воды в Кыгинский залив

В дальнейшем в период с 01.05 по 25.05 по мере достаточно быстрого возрастания расхода и температуры воды реки Чулышман, эта смесь речной и озерной воды, проникая в залив, распространяется снизу вверх (см. рис. 4.12 фрагмент а), заполняя все большую часть объема Кыгинского залива.

Общее представление о дальнейших термодинамических событиях в Кыгинском заливе в период весеннего нагревания дает рис. 4.13, на котором изображены кривые пространственно-временных траекторий перемещения фронтов локального ТБСП и РТБ по поверхности залива, построенные по результатам ЧЭ II.1 (включены все переменные сезонного внешнего воздействия) и ЧЭ II.3 (отключены все составляющие гидрологических внешних воздействий).

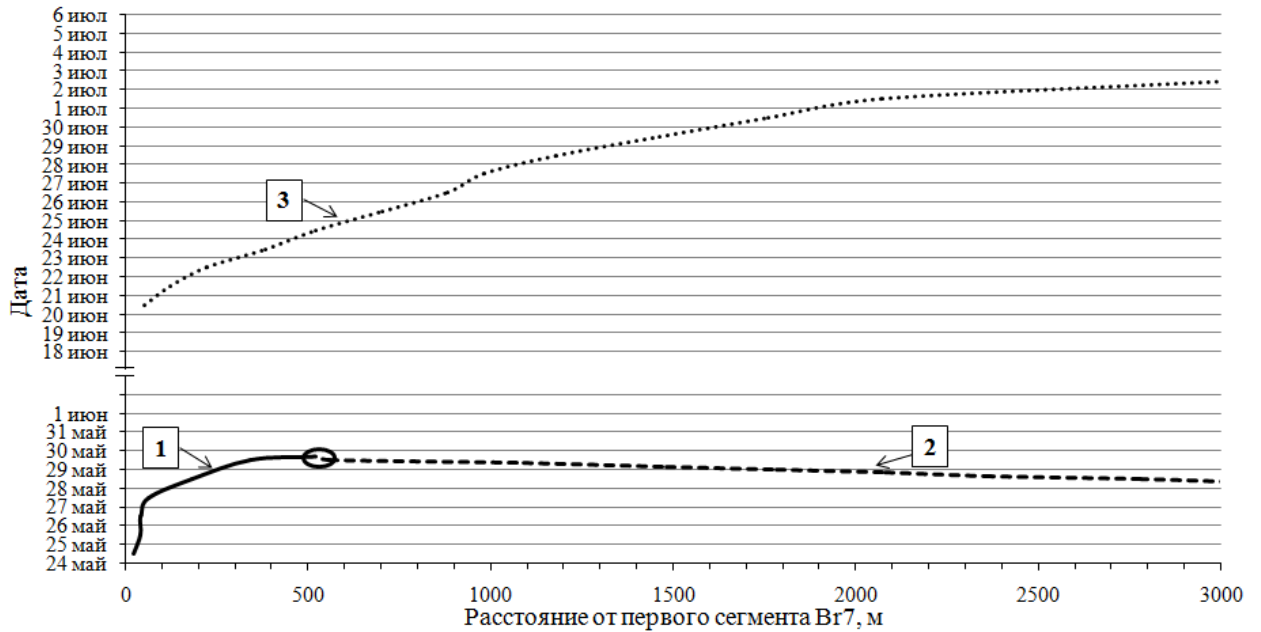


Рисунок 4.13 – Пространственно-временная изменчивость среднесуточного положения фронтов термических баров в Кыгинском заливе. Кривая 1 – ТБСП Кыгинского залива и кривая 2 – РТБ, проникшего в залив из акватории озера, построены по результатам ЧЭ II.1. Кривая 3 характеризует локальный термический бар Кыгинского залива, рассчитанный в ЧЭ II.3. Овалом обозначено место и время слияния соответствующих термических баров

По результатам ЧЭ II.1 к 25.05 вблизи устья реки Кыга возникает локальный термический бар смешенной природы (ТБСП), который генерируются частично за счет притока относительно теплой воды реки Кыга и частично за счет весеннего прогревания вод на мелководьях Кыгинского залива (см рис. 4.13, кривая 1). Однако из-за незначительного по площади мелководья и относительно небольших расходов реки Кыга в конце третьей декады мая ТБСП за четверо суток успевает «пройти» лишь около 500 м до момента слияния с «Чулышманским» РТБ, который проникает в Кыгинский залив 28.05 и быстро перемещается на встречу с «Кыгинским» ТБСП (см. рис. 4.13, кривые 1 и 2). При этом важно подчеркнуть, что дата перехода температуры поверхности воды в Кыгинском заливе через  $T_{md}$ , полученная в ЧЭ II.1 – 29.05, оказывается близкой к аналогичной дате (30.05), полученной по среднегодовым наблюдениям и представленной в табл. 37 работы [64]. Напомним, что при использовании сетки РС1, без аппроксимации Кыгинского залива в виде отдельного Вг, разница между рассчитанной и наблюдаемой датами перехода через  $T_{md}$  в заливе превышала 5 суток.

Как видно из сравнения кривых 1 и 3 рис. 4.13, фронт локального термического бара Кыгинского залива в ЧЭ II.3 формируется на месяц позднее (21.06) чем в II.1. По мере возникновения в мелководной зоне залива фронт этого термобара медленно (в среднем 230 м/сут) перемещается к границе «залив–озеро» и достигает этой границы только 2 июля.

Следует отметить, что кривые, полученные по результатам ЧЭ П.2 (в отличие от П.1 не учитывается ветровое воздействие) и ЧЭ П.4 (в отличие от П.3 также не учитывается ветровое воздействие), практически идентичны кривым, отображенным на рис. 4.13, и в связи с этим здесь не приводятся.

После слияния ТБСБ и РТБ термический режим Кыгинского залива зависит от радиационно-турбулентного теплообмена на поверхности водоема и ветро-волновых процессов, что, в частности, иллюстрирует рис. 4.14. На этом рисунке показаны кривые температуры воды в поверхностном и придонном слоях залива в точке гидрологической вертикали 28, полученные в ЧЭ П.1 и П.2. Значения температуры воды в придонном слое в этой точке, полученные в ЧЭ П.1 и П.2, практически совпадают и изображены на рис. 4.14, как кривая 3.

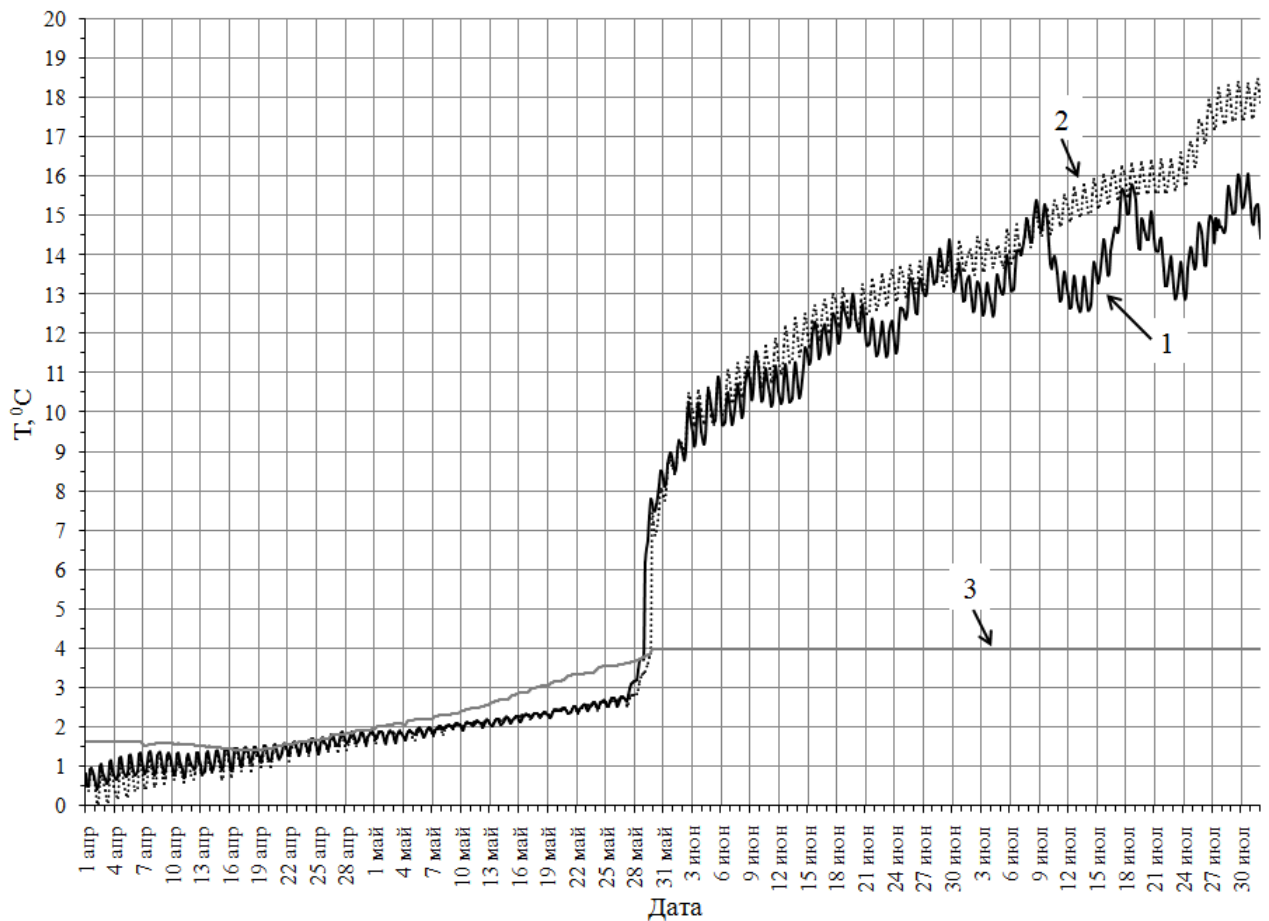


Рисунок 4.14 – Поверхностная и придонная температуры Кыгинского залива в точке гидрологической вертикали 28. Кривая 1 – график поверхностной температуры воды, построенный по результатам ЧЭ П.1, кривая 2 – график поверхностной температуры воды, построенный по результатам ЧЭ П.2, кривая 3 – график придонной температуры воды, построенный по результатам ЧЭ П.1

На рис. 4.14 кривая 3 (ЧЭ П.1) на временном интервале с 1.04 по 29.05 фиксирует постепенное увеличение  $T_L$  в придонном слое залива (в точке гидрологической вертикали 28), обусловленное проникновением сюда смеси озерной и речной воды реки Чулышман. На

интервале с 29.5 по 30.07 рассчитанные значения придонной температуры оказываются близкими к значению  $T_{md}$ . На кривой 2, полученной по результатам ЧЭ II.2, ярко выражен суточный ход поверхностной температуры озера, при этом на временном интервале с 01.04 по 28.05 эта кривая показывает постепенное нарастание температуры воды с 0.8 до 3.5 °С. Прохождение фронта РТБ с 28.05 по 30.05 приводит к резкому увеличению с 3.5 до 8 °С этой температуры. После слияния фронтов РТБ и ТБСП Кыгинского залива на временном интервале с 30.05 по 1.08, на кривой 2 наблюдается плавное повышение  $T_L$ , вызванное преимущественно радиационно-турбулентным теплообменом на поверхности залива. В отличие от кривой 2 на кривой 1, полученной по результатам ЧЭ II.1, на временном интервале с 30.05 по 1.08 на сезонную моду ЧЭ II.2 (кривая 2) накладывается влияние ветрового режима, который сценарно представлен периодической сменой «верховок» и «низовок» (см. рис. 2.9).

Исходя из сопоставительного анализа кривых 1–3 на рис. 4.13 и 4.14 можно сделать однозначный вывод о том, что определяющими факторами в формировании термического режима Кыгинского залива в период весеннего нагревания являются поверхностный теплообмен и влияние проникающих в залив вод реки Чулышман. В период летнего нагревания к числу значимых факторов в динамике поверхностной температуры залива можно отнести ветровое воздействие.

Описание термодинамических событий в Камгинском заливе начнем с краткого представления характеристик батиметрии этого залива. Длина залива – 6,6 км, средняя ширина около 1,1 км. Средняя и максимальная глубины составляют 28 и 180 м, соответственно. В северной части залива в него впадает река Камга с площадью водосбора 202 км<sup>2</sup>.

Общее представление о термодинамических событиях в Камгинском заливе в период весеннего нагревания дает рис. 4.15, на котором изображены кривые пространственно-временных траекторий перемещения фронтов термических баров по поверхности залива, построенные по результатам ЧЭ II.2 (отключено ветровое воздействие) и ЧЭ II.4 (отключено ветровое воздействие и все переменные гидрологических внешних воздействий, в т.ч. расход реки Камга задан равным нулю).

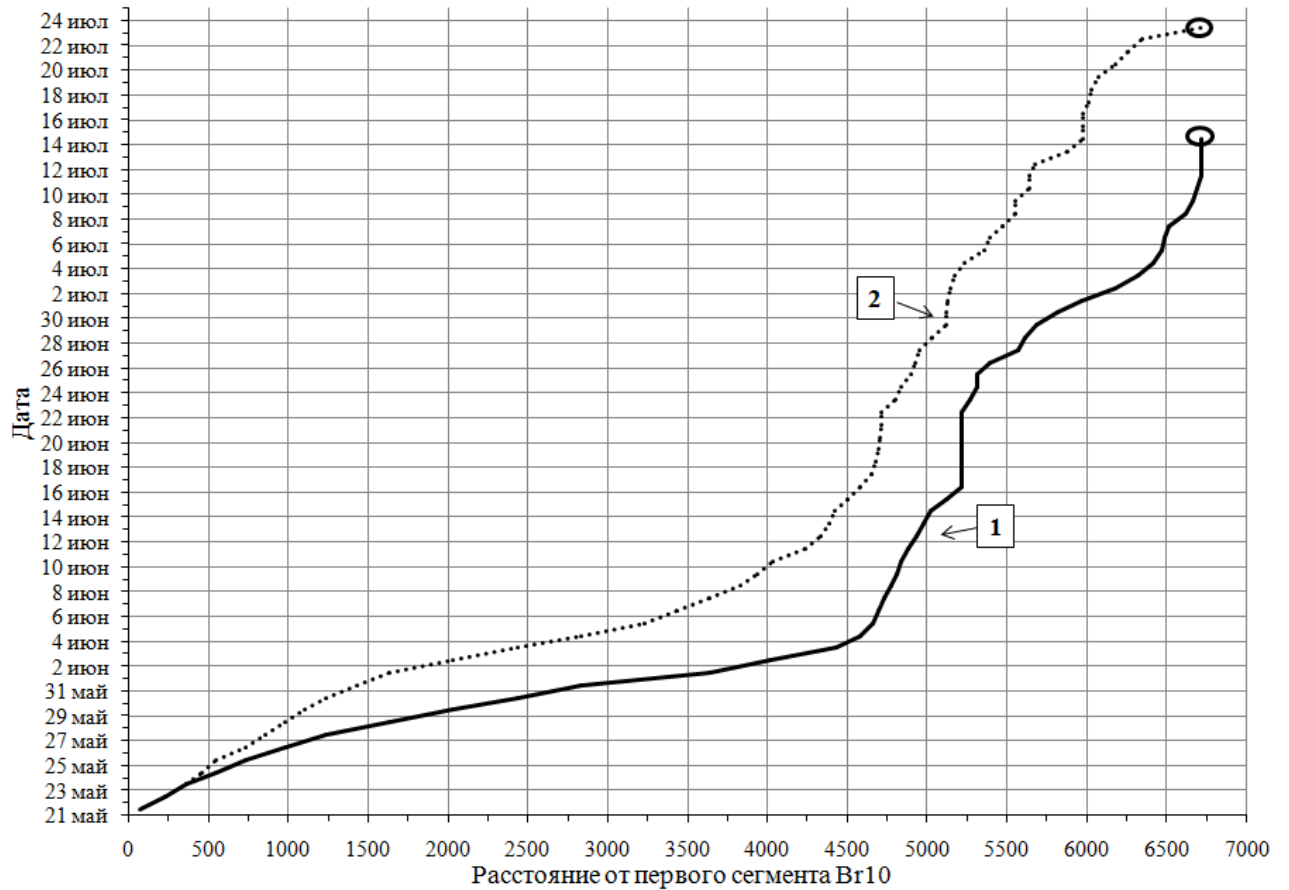


Рисунок 4.15 – Пространственно-временная изменчивость среднесуточного положения фронтов термических баров в Камгинском заливе. Кривая 1 построена по результатам ЧЭ П.2. Кривая 2 построена по результатам ЧЭ П.4. Овалами обозначены место и время слияния соответствующих термических баров Камгинского залива с ОТБ

Кривая 1 на рис. 4.15 позволяет проанализировать сезонную динамику перемещения локального термического бара, генерируемого за счет весеннего прогревания вод на значительном по площади мелководье Камгинского залива и частично за счет притока реки Камга без учета ветрового воздействия. Фронт ТБСП Камгинского залива возникает 21 мая на обширном мелководном участке, примыкающем к устью реки Камга (длина этого участка около 4.5 км), и перемещается с востока на запад в сторону глубоководной части залива. Особенностью ТБСП в Камгинском заливе является специфическая структура полей  $T_L$  и  $U$  в окрестностях фронта, обусловленная морфометрией залива. Это хорошо видно при рассмотрении графических отображений полей  $T$  и  $U$  на рис. 4.17. Прогретые к концу мая на мелководье более плотные воды залива, с температурой близкой к  $T_{md}$ , начинают «скатываться» по крутому склону глубоководной части залива, а менее плотные воды, поступающие в залив с акватории озера, «запирают» фронт ТБСП.

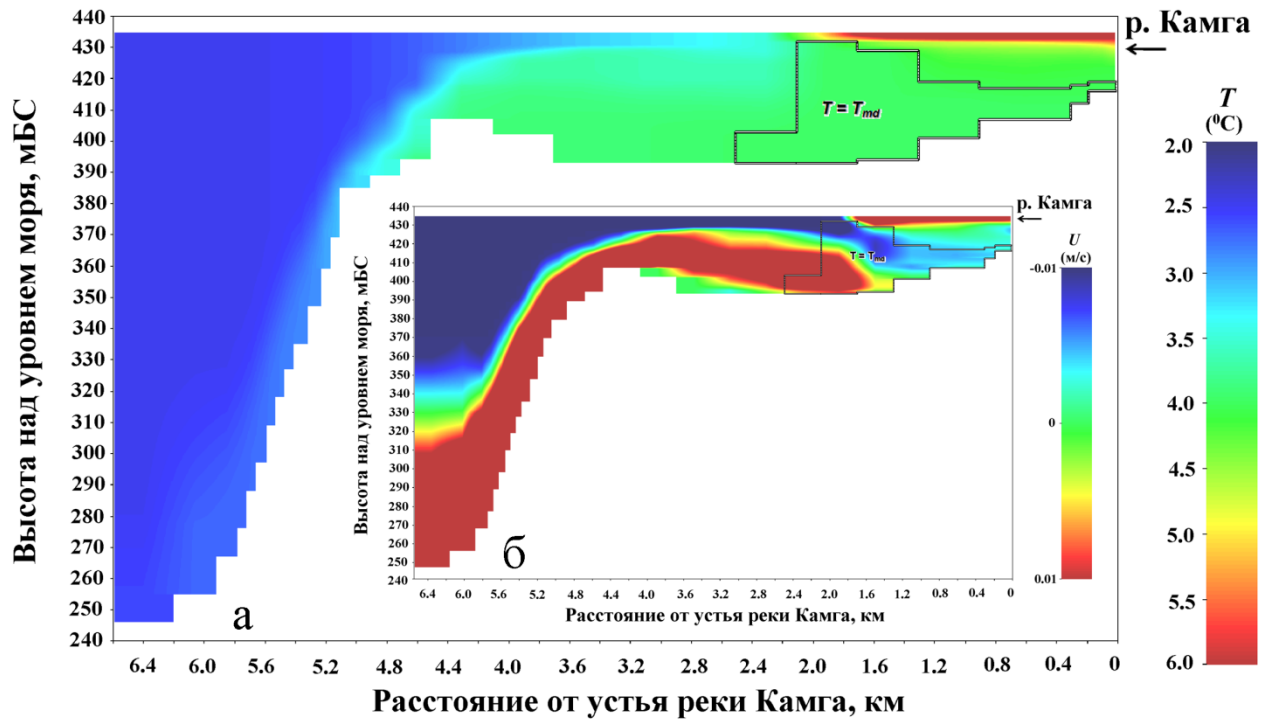


Рисунок 4.17 – Поля температуры воды (а) и горизонтальной скорости течения (б) в Камгинском заливе, полученные в численном эксперименте П.1 на 30 мая

Анализ кривой 1 рис. 4.15 показывает, что локальный фронт ТБСП Камгинского залива в ЧЭ П.1 проходит мелководный участок залива за период с 21.05 по 04.06 при средней скорости перемещения равной 230 м/сут. После 04.06 в связи с резким возрастанием глубин Камгинского залива, скорость перемещения этого фронта ТБСП уменьшается до 55 м/сут на временном интервале с 04.06 по 14.07, т.е. до момента слияния вблизи границы «залив-озеро» с ОТБ, возникшим 10.06 в сегменте 312 на северо-западном мелководном участке Вг9 (см. кривую 2 на рис. 4.2).

В ЧЭ П.4, при отключенном поступлении в залив вод реки Камга и без учета ветрового воздействия, фронт локального термического бара формируется 22.05, что всего на сутки позднее, чем в ЧЭ П.2. По мере возникновения фронт этого термобара (ЧЭ П.4, см. кривую 2 на рис. 4.15) проходит мелководный участок залива за период с 22.05 по 16.06, при средней скорости перемещения равной 145 м/сут. С переходом в глубоководную часть залива 16.06 скорость перемещения этого фронта, на временном интервале с 16.06 до момента слияния (23.07) с ОТБ (см. кривую 4 на рис. 4.2), составляет 62 м/сут, что сопоставимо с аналогичной скоростью, полученной в ЧЭ П.2, для глубоководного участка залива.

На рис. 4.18, по аналогии с рис. 4.15, изображены кривые пространственно-временных траекторий перемещения фронтов термических баров по поверхности Камгинского залива построенные по результатам ЧЭ П.1 (включены все переменные сезонного внешнего

воздействия) и ЧЭ II.3 (отключены все составляющие гидрологических внешних воздействий).

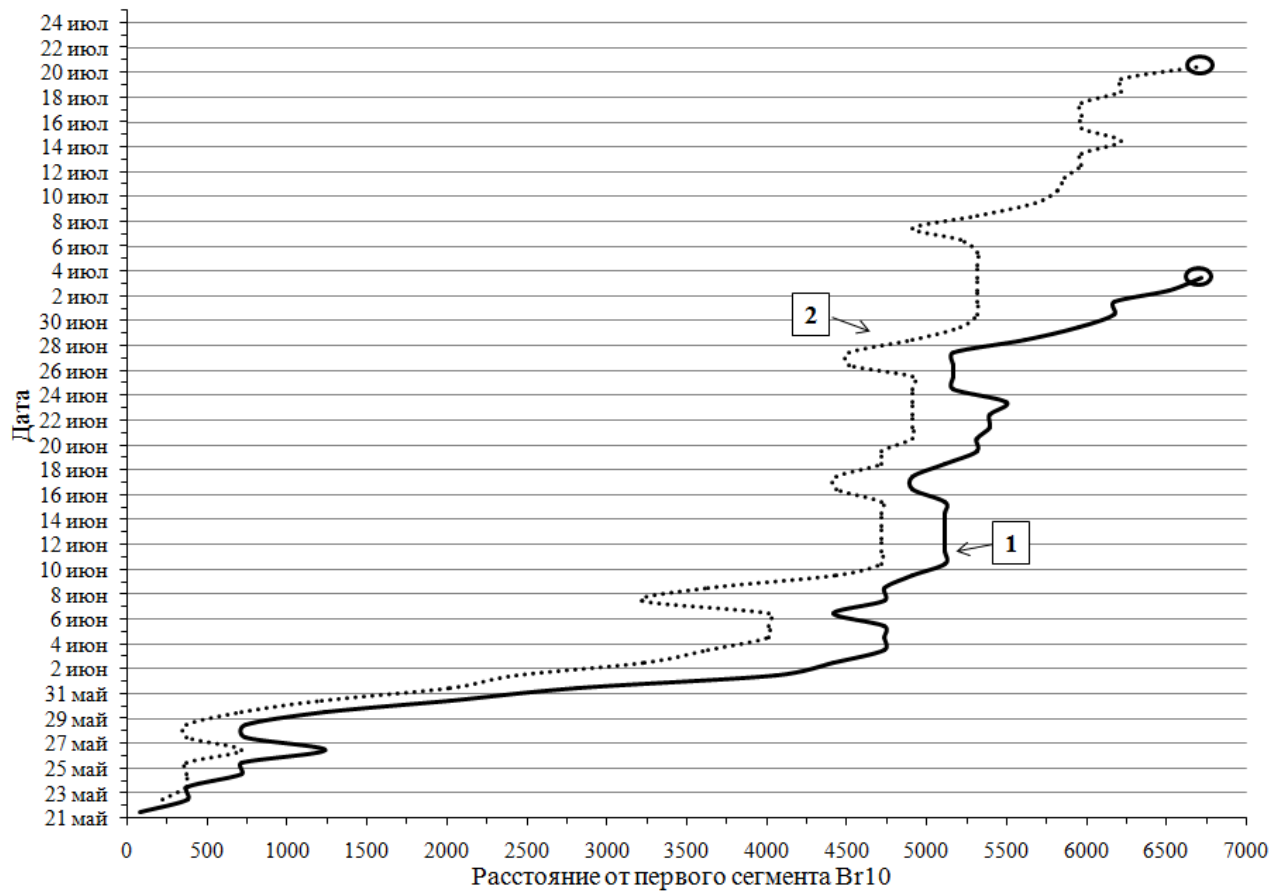


Рисунок 4.18 – Пространственно-временная изменчивость среднесуточного положения фронтов ТБСП в Камгинском заливе. Кривая 1 построена по результатам ЧЭ II.1. Кривая построена по результатам ЧЭ II.3

Анализ кривых 1 и 2 рис. 4.18 и их сравнение с соответствующими кривыми 1 и 2 рис. 4.15 показывает, что распределение скоростей перемещения локального фронта ТБСП в Камгинском заливе в значительной мере определяется дрейфовыми течениями, вызванными ветрами системы «верховки–низовки», совпадающими с ориентацией хребтов береговой зоны Камгинского залива. Однако средние значения скоростей перемещения фронта ТБСП для мелководной (ЧЭ II.1 – 246 м/сут; ЧЭ II.3 – 164 м/сут) и глубоководной (ЧЭ II.1 – 72 м/сут; ЧЭ II.3 – 58 м/сут) частей залива близки к аналогичным скоростям, полученным в ЧЭ II.2 и II.4.

Исходя из сопоставительного анализа кривых 1 и 2, отображенных на рис. 4.15 и 4.18, можно сделать вывод о том, что определяющим фактором в формировании термического режима Камгинского залива является весеннее прогревание вод на значительном по площади мелководье залива. Вместе с тем, на динамику переменных термического режима этого залива заметное влияние оказывают приток воды реки Камга, прежде всего на мелководном



участке (см. фрагмент а рис. 4.17) и ветровой режим на глубоководном участке (см. кривую 1 на рис. 4.18 после 4 июня).

В заключение настоящей главы отметим, что результаты численных экспериментов П.1–П.4 позволили достаточно полно исследовать пространственно-временную изменчивость гидротермодинамического режима Телецкого озера с учетом расхода и температуры воды главного притока – р. Чулышман, оттока – р. Бия и значимых боковых притоков – реки Кыга, Большие Чили, Кокши, Кыга, Чеченег, Самыш при различных сценариях сезонной изменчивости гидрологических и метеорологических внешних воздействий.

Сопоставительный анализ результатов расчетов второй тематической группы численных экспериментов (ЧЭ П.1 – П.4) показал, что хотя радиационно-турбулентный теплообмен на поверхности водоема дает основной вклад в тепловой баланс озера, основной приток – р. Чулышман и сток – р. Бия контролируют циркуляционные структуры и в значительной мере определяют термодинамический режим Телецкого озера в период весенне-летнего нагревания.

Если сравнивать полученные результаты с результатами, опубликованными в работах [33–37, 135, 136], то численные эксперименты второй тематической группы (ЧЭ П.1 – П.4) позволили детализировать и уточнить процессы формирования, перемещения и слияния речного и озерного термических баров Телецкого озера в период весенне-летнего нагревания, а также произвести качественную и количественную оценку ветрового воздействия на термический режим водоема. Новыми являются результаты, полученные для Кыгинского и Камгинского заливов, в частности, впервые воспроизведены возникающие в них собственные локальные термические бары.

Напомним, что верификация ЧЭ второго тематического блока проводилась на основе качественного и при наличии репрезентативных данных количественного сравнения результатов расчетов с феноменологической моделью Селегея [64] и для ранних стадий периода весеннего нагревания с феноменологической моделью Кармака [96]. Однако для того, чтобы провести полную количественную верификацию результатов расчетов ЧЭ этого блока, особенно в заливах Телецкого озера, необходима организация стационарной сети наблюдений высокого пространственно-временного разрешения (например, сеть автоматических гидрометеорологических станций). Результаты численных экспериментов этой главы могут быть использованы для планирования и обоснования таких сетей наблюдений.

**5 Оценка прогностических возможностей ИВК «Телецкое озеро» по численному воспроизведению особенностей термического режима водоема при прямом учете внутрисуточной и синоптической изменчивости переменных метеорологических и гидрологических внешних воздействий по данным наблюдений за апрель-июль 1968 года**

Если в двух предыдущих разделах НИР излагаются результаты преимущественно теоретического изучения возможностей применения модели W2 в составе ИВК «Телецкое озеро», то в данном разделе представлены количественные оценки прогностических возможностей этой модели по воспроизведению пространственно-временной динамики термического режима озера за конкретный период весеннего и летнего нагревания в апреле – июле 1968 г. Мотивация выбора именно 1968 г. в качестве основного года для проведения детальной верификации переменных термического режима озера и состав информации, включенной в модуль 2 БД ИВК за 1968 г., подробно описаны в разделе 2.1.2. В основе указанной верификации лежит сравнение данных измерений температуры воды в озере ( $T_L$ ) на всех 11 пунктах наблюдений (рейдовые вертикали и вертикали гидрологических разрезов, см. рис. 1.1) Озерной станции ЗС УГМС [44] с результатами расчетов  $T_L$  в ЧЭ Ш.1, проведенным с полным набором переменных метеорологических (8-срочные данные, см. рис. 2.11 и 2.12) и гидрологических (суточные данные, см. рис. 2.13) внешних воздействий. Период моделирования в ЧЭ Ш.1 – с 1.04 по 1.08 1968 г., расчетная сетка – РС2. Начальная средняя толщина ледового покрова на участках Vr8 – Vr10 задавалась, согласно работе [64], равной 0,5 м. Соотношения для расчета начальной  $T_L$  с учетом наличия ледового покрова приведены в табл. 2.1. Все данные наблюдений, использованные в ЧЭ Ш.1, были подвергнуты экспертной оценке на достоверность с участием В.В. Селегея.

Общее представление об изменчивости среднесуточных уровней поверхности воды Телецкого озера за период расчетов с 01.04 по 01.08.68 г. дает рис. 5.1. Определенное количественное представление о сравнении результатов расчетов  $\eta_M$  по модели W2 и данных наблюдений уровней воды –  $\eta_H$  (всего для г/п Яйлю оценено  $N = 122$  прогноза) дают следующие значения ошибок:  $ME = - 0,011$  м,  $MAE = 0,012$  м,  $RMSE = 0,014$  м, где

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N \eta_H - \eta_M \text{ – среднеарифметическая, } MAE = \frac{1}{N} \sum_{N=1}^N |\eta_H - \eta_M| \text{ – средняя абсолютная,}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{N=1}^N (\eta_H - \eta_M)^2} \text{ – среднеквадратическая ошибки расчетов.}$$

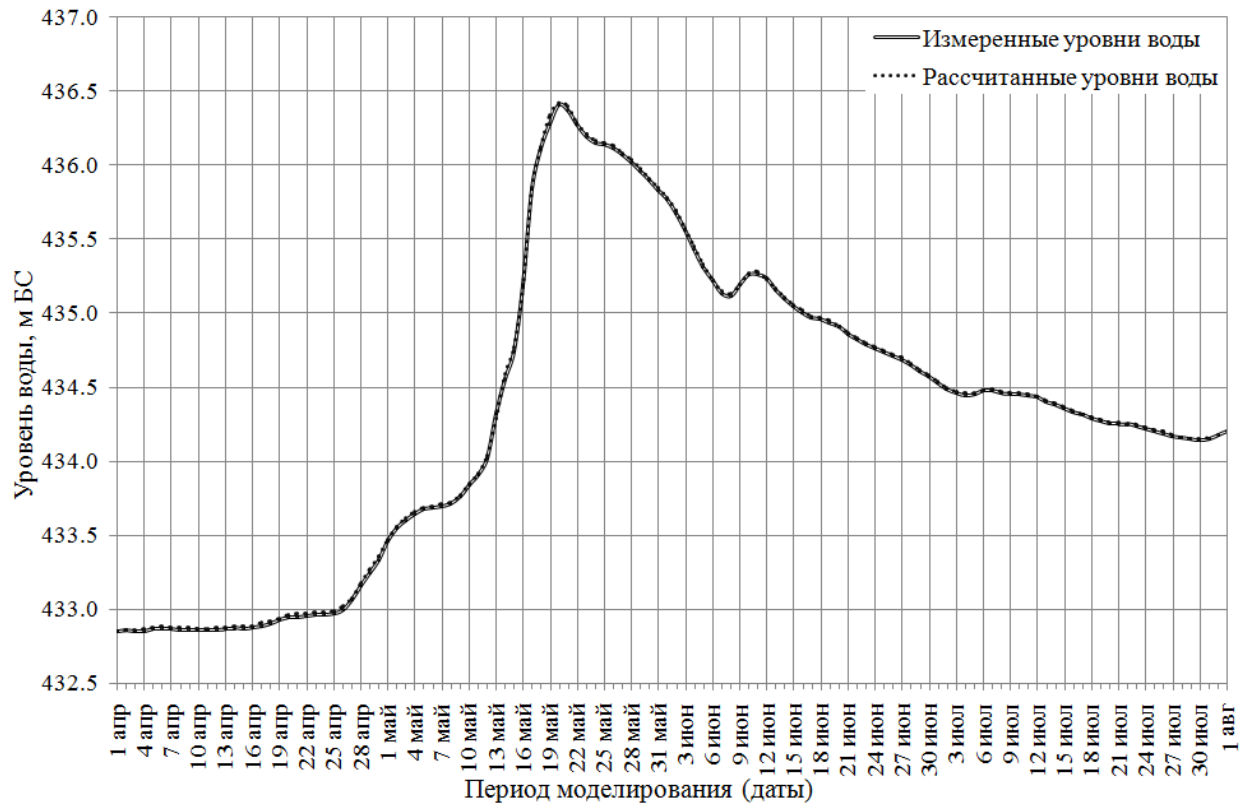


Рисунок 5.1 – Графики измеренных (сплошная линия) и рассчитанных по модели W2 (пунктирная линия) значений уровня воды Телецкого озера на г/п Яйлю за период с 01.04 по 01.08.1968 г.

Данные измерений  $\eta$ , показанные на рис. 5.1, были использованы для восстановления суммарной невязки расходов боковых притоков к озеру, которые не обеспечены соответствующими наблюдениями. Далее используя алгоритм, описанный в разделе 2.3, главы 2, рассчитывались среднесуточные значения расходов воды боковых притоков, идентифицированных в численной модели W2 как реки Самыш, Колдор, Камга, Кокши, Большие Чили и Кыга. Для задания температуры воды указанных боковых притоков использовались данные наблюдений с ближайших гидрологических постов на реках Чири, Кокши, Чеченег и методика описанная в главе 8 работы [64].

Прежде чем переходить к описанию результатов верификации, хотелось бы отметить, что при анализе прогностических возможностей модели W2 нами уделялось повышенное внимание рассмотрению ситуаций с большими ошибками прогнозов  $T_L$  и, по возможности, производилась идентификация причины таких ошибок и формулировались конкретные предложения по их уменьшению при дальнейшем развитии ИВК «Телецкое озеро».

### 5.1 Анализ результатов прогнозов температуры воды в поверхностном и придонном слоях Телецкого озера

Общее представление о детальной структуре временных рядов двух прогностических переменных:  $T_{LS}$  – температура воды в поверхностном слое и  $T_{LB}$  – температура воды в придонном слое, с 1 апреля по 1 августа 1968 г., для характерных лимнообластей Телецкого озера: южной и северной частей меридионального участка водоема (Кыгинский залив – рейдовая вертикаль 28, сегмент 203, средняя глубина 100 м и р. Б. Корбу – рейдовая вертикаль 26, сегмент 145, средняя глубина 323 м), восточной и западной частей широтного участка озера (п. Яйлю – рейдовая вертикаль 6, сегмент 224, средняя глубина 256 м и мыс Караташ – рейдовая вертикаль № 23, сегмент 272, средняя глубина 14 м) дают рис. 5.2 – 5.5.

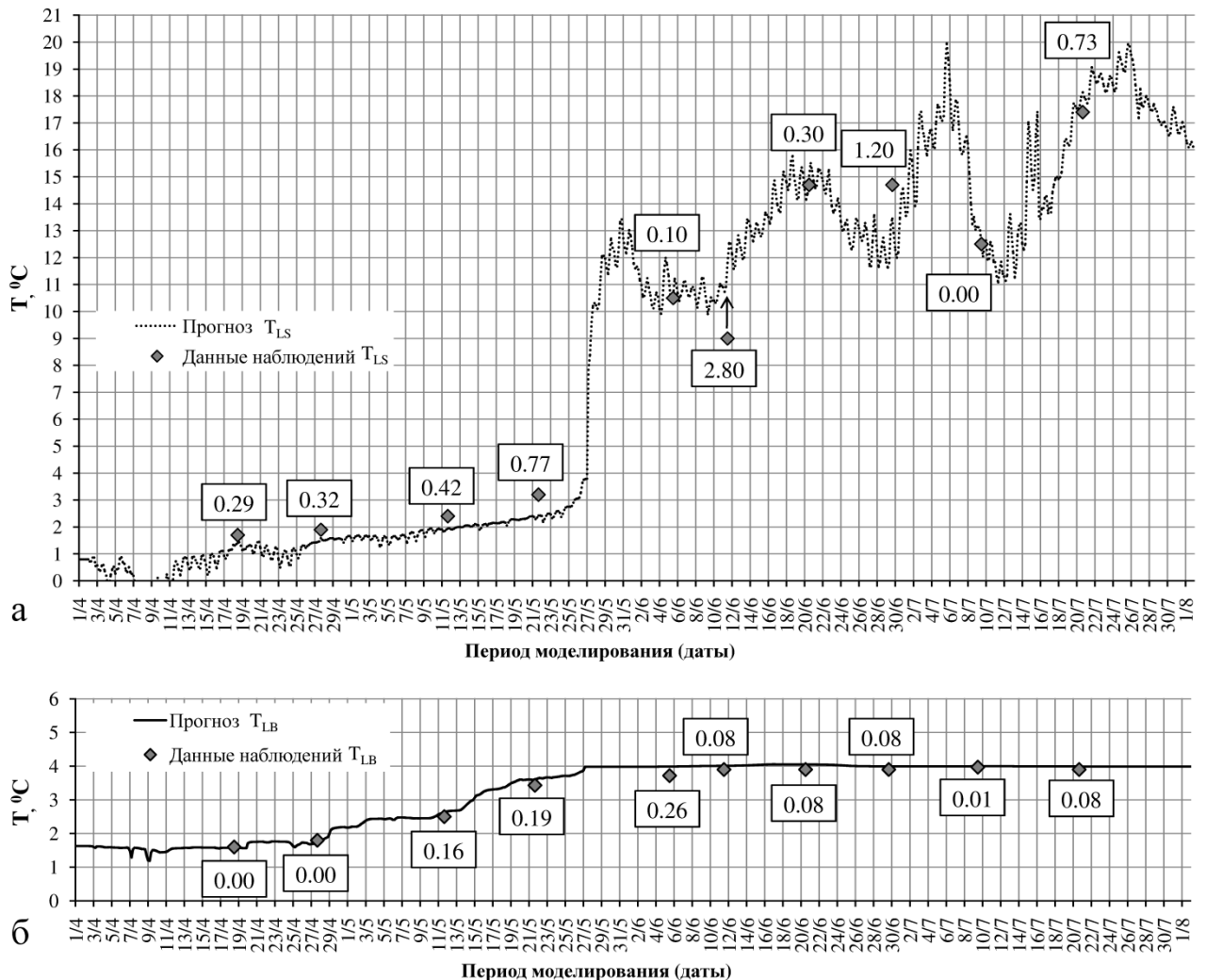


Рисунок 5.2 – Временной ряд поверхностной (фрагмент а) и придонной (фрагмент б) температуры воды Телецкого озера на рейдовой вертикали № 28 (Кыгинский залив) с 01.04 по 01.08.1968 г. Кривые – прогностические значения, ромбы – данные наблюдений. В прямоугольниках цифрами указаны абсолютные ошибки прогнозов  $T_{LS}$  и  $T_{LB}$  ( $^\circ\text{C}$ )

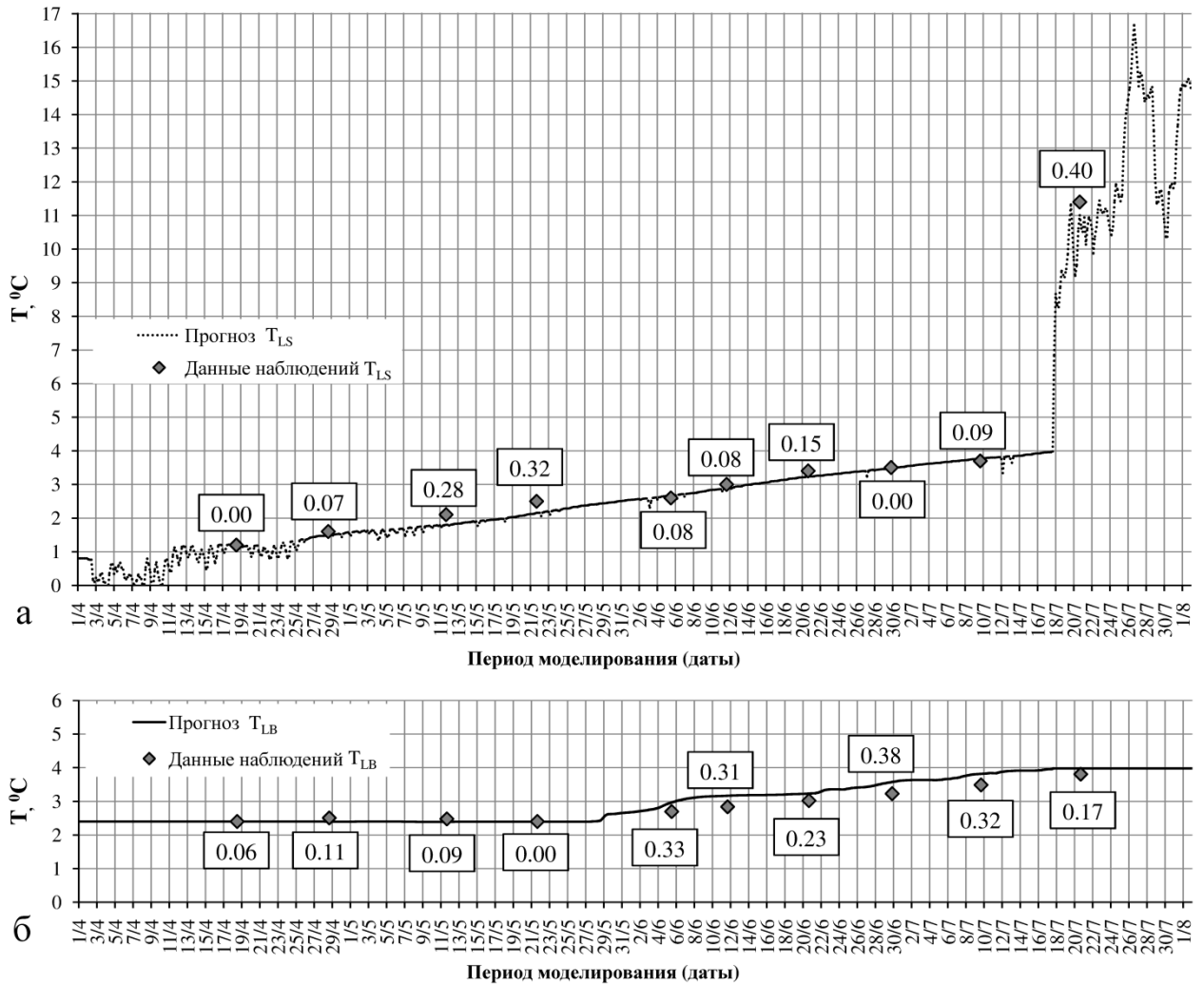


Рисунок 5.3 – Временной ряд поверхностной (фрагмент а) и придонной (фрагмент б) температуры воды Телецкого озера на рейдовой вертикали № 26 (р. Б. Корбу) с 01.04 по 01.08.1968 г. Кривые – прогностические значения, ромбы – данные наблюдений. В прямоугольниках цифрами указаны абсолютные ошибки прогнозов  $T_{LS}$  и  $T_{LB}$  (°C)

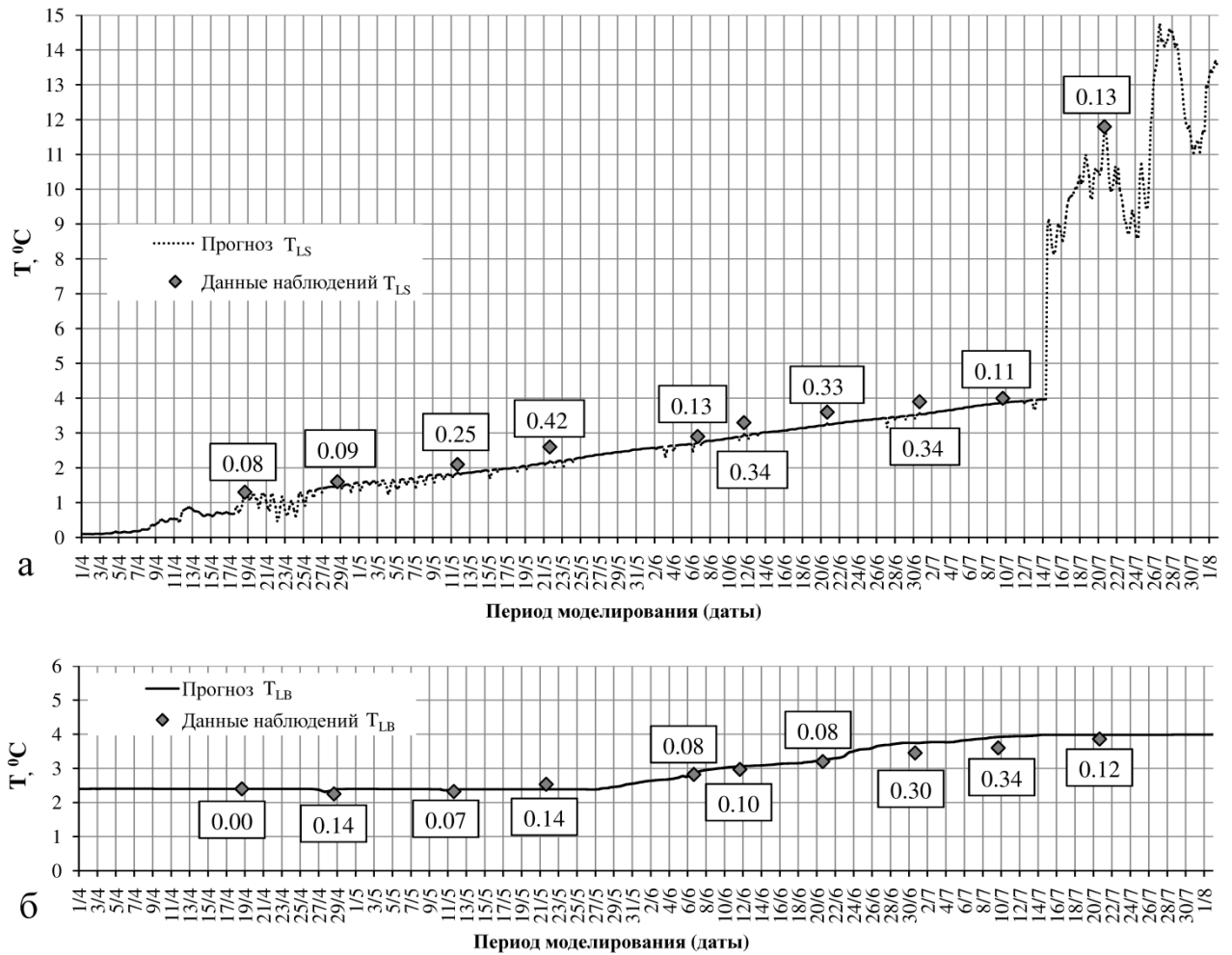


Рисунок 5.4 – Временной ряд поверхностной (фрагмент а) и придонной (фрагмент б) температуры воды Телецкого озера на рейдовой вертикали № 6 (п. Яйлю) с 01.04 по 01.08.1968 г. Кривые – прогностические значения, ромбы – данные наблюдений. В прямоугольниках цифрами указаны абсолютные ошибки прогнозов  $T_{LS}$  и  $T_{LB}$  (°C)

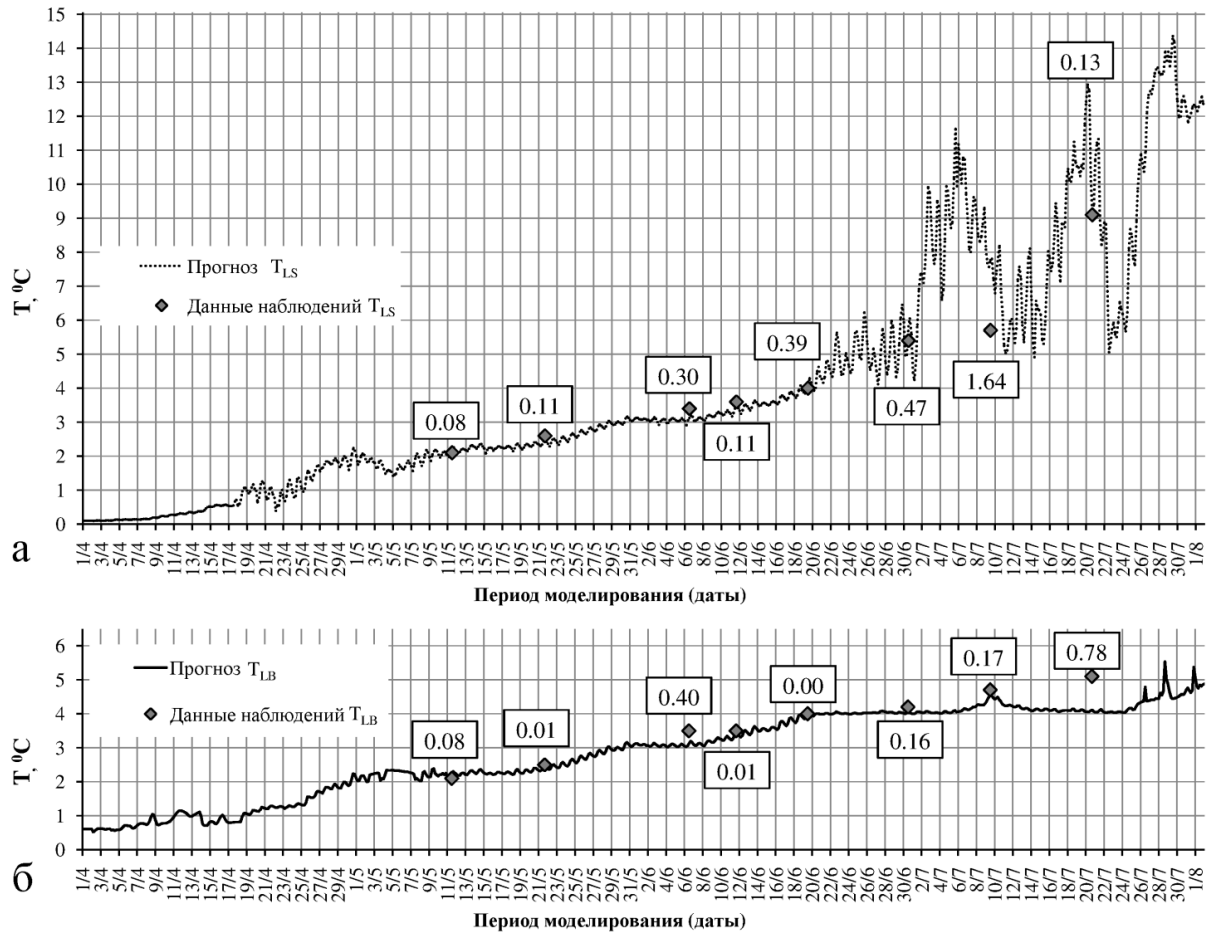


Рисунок 5.5 – Временной ряд поверхностной (фрагмент а) и придонной (фрагмент б) температуры воды Телецкого озера на рейдовой вертикали № 23 (мыс Караташ) с 01.04 по 01.08.1968 г. Кривые – прогностические значения, ромбы – данные наблюдений. В прямоугольниках цифрами указаны абсолютные ошибки прогнозов  $T_{LS}$  и  $T_{LB}$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

Рисунки 5.2 – 5.5 позволяют легко идентифицировать для каждого из четырех пунктов наблюдений периоды весеннего нагревания с  $T_{LS} \leq 4^{\circ}\text{C}$ , временные интервалы прохождения фронтов термического бара (речного на рис. 5.2 и 5.3, озерного на рис. 5.4 и 5.5) и периоды летнего нагревания с  $T_{LS} > 4^{\circ}\text{C}$ . Для периодов летнего нагревания по сравнению с соответствующими периодами весеннего нагревания характерно резкое возрастание нерегулярных возмущений  $T_{LS}$  большой амплитуды. Это обусловлено в первую очередь квазистохастическим (разномасштабным по времени и пространству) характером изменчивости параметров атмосферных воздействий (см. рис. 2.11 и 2.12) при летней преимущественно устойчивой стратификации верхних слоев озера. Так, согласно работам [6, 62–64, 99], изменчивость параметров метеорологических внешних воздействий формируется наложением на квазирегулярный сезонный ход этих параметров сильно изменчивых синоптических (с характерными временными масштабами  $T = 5\text{--}7$  суток), фронтальных ( $T = 1\text{--}3$  суток), мезомасштабных ( $T \approx 1$  сутки), микро и внутрисуточных (3–6 часов) возмущений как метеорологических, так и гидрологических внешних воздействий. Заметим, что из

сопоставления кривых рассчитанных значений  $T_{LS}$  и соответствующих данных наблюдений, полученных с интервалами один раз в 10 дней, для периода летнего нагревания (см. рис. 5.2 – 5.5) следует очевидный вывод о недостаточности имеющихся данных измерений для корреляционного анализа ошибок прогнозов.

Для количественной оценки прогностического потенциала ИВК «Телецкое озеро» приведена табл. 5.1, которая содержит измеренные и прогностические значения  $T_{LS}$  и соответствующие значения  $AE_S$  (абсолютная ошибка) для каждого из 11 пунктов наблюдений за период с 18.04 по 20.07.1968 г.

Таблица 5.1 – Данные наблюдений ( $T_{LS}$ ), результаты прогнозов (Прогноз) и абсолютные ошибки ( $AE_S$ ) температуры воды в поверхностном слое Телецкого озера за апрель – июль 1968 г.

Пункт наблюдений	Кыгинский залив, вертикаль 28, сегмент 203									
Дата	18.04	27.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
$T_{LS}, ^\circ\text{C}$	1.70	1.90	2.40	3.20	10.50	9.00	14.70	14.70	12.50	17.40
Прогноз, $^\circ\text{C}$	1.41	1.58	1.98	2.43	10.60	11.80	15.00	13.50	12.50	18.13
$AE_S, ^\circ\text{C}$	0.29	0.32	0.42	0.77	0.10	2.80	0.30	1.20	0.00	0.73
Пункт наблюдений	Мыс Кырсай, вертикаль 19, сегмент 103									
Дата	18.04	27.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
$T_{LS}, ^\circ\text{C}$	1.30	1.80	2.20	2.50	3.50	7.00	8.90	14.70	7.80	15.60
Прогноз, $^\circ\text{C}$	1.35	1.41	1.88	2.23	2.88	3.04	12.20	11.40	8.67	17.30
$AE_S, ^\circ\text{C}$	0.05	0.39	0.32	0.27	0.62	<b><u>3.96</u></b>	<b><u>3.30</u></b>	<b><u>3.30</u></b>	0.87	1.70
Пункт наблюдений	р. Челюш, вертикаль 27, сегмент 120									
Дата	18.04	27.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
$T_{LS}, ^\circ\text{C}$	1.30	1.90	2.30	2.60	3.10	3.40	5.70	6.40	6.20	14.40
Прогноз, $^\circ\text{C}$	1.25	1.41	1.83	2.28	2.70	2.86	3.27	3.59	7.77	16.00
$AE_S, ^\circ\text{C}$	0.05	0.49	0.47	0.32	0.40	0.54	2.43	2.81	1.57	1.60
Пункт наблюдений	р. Кокши, вертикаль 13, сегмент 130									
Дата	18.04	27.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
$T_{LS}, ^\circ\text{C}$	1.40	1.80	2.20	2.60	3.00	3.20	3.60	3.80	5.60	9.00
Прогноз, $^\circ\text{C}$	1.21	1.43	1.81	2.26	2.65	2.87	3.28	3.53	5.69	12.80
$AE_S, ^\circ\text{C}$	0.19	0.37	0.39	0.34	0.35	0.33	0.32	0.27	0.09	<b><u>3.80</u></b>



Продолжение таблицы 5.1

Пункт наблюдений	р. Б. Корбу, вертикаль 26, сегмент 145									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
$T_{LS}, ^\circ C$	1.20	1.60	2.10	2.50	2.60	3.00	3.40	3.50	3.70	11.40
Прогноз, $^\circ C$	1.20	1.53	1.82	2.18	2.68	2.92	3.25	3.50	3.79	11.00
$AE_S, ^\circ C$	0.00	0.07	0.28	0.32	0.08	0.08	0.15	0.00	0.09	0.40
Пункт наблюдений	Камгинский залив, вертикаль 25, сегмент 335									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	19.06	30.06	9.07	20.07
$T_{LS}, ^\circ C$	–	–	2.30	3.20	–	12.10	11.30	12.30	7.60	11.50
Прогноз, $^\circ C$	–	–	2.28	3.25	–	8.91	11.10	11.40	7.61	11.50
$AE_S, ^\circ C$	–	–	0.02	0.05	–	<b>3.19</b>	0.20	0.90	0.01	0.00
Пункт наблюдений	п. Яйлю, вертикаль 6, сегмент 224									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	20.06	30.06	9.07	20.07
$T_{LS}, ^\circ C$	1.30	1.60	2.10	2.60	2.90	3.30	3.60	3.90	4.00	11.80
Прогноз, $^\circ C$	1.22	1.51	1.85	2.18	2.77	2.96	3.27	3.56	3.89	11.67
$AE_S, ^\circ C$	0.08	0.09	0.25	0.42	0.13	0.34	0.33	0.34	0.11	0.13
Пункт наблюдений	мыс Ажи, вертикаль 24, сегмент 237									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	19.06	30.06	9.07	20.07
$T_{LS}, ^\circ C$	–	–	2.10	2.50	2.90	3.30	3.50	3.90	4.20	9.20
Прогноз, $^\circ C$	–	–	1.88	2.20	2.75	3.00	3.41	3.74	3.97	10.40
$AE_S, ^\circ C$	–	–	0.22	0.30	0.15	0.30	0.09	0.16	0.23	1.20
Пункт наблюдений	мыс Караташ, вертикаль 23, сегмент 272									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	19.06	30.06	9.07	20.07
$T_{LS}, ^\circ C$	–	–	2.10	2.60	3.40	3.60	4.00	5.40	5.70	9.10
Прогноз, $^\circ C$	–	–	2.18	2.49	3.10	3.49	4.39	5.87	7.34	8.97
$AE_S, ^\circ C$	–	–	0.08	0.11	0.30	0.11	0.39	0.47	1.64	0.13

Продолжение таблицы 5.1

Пункт наблюдений	с. Артыбаш, вертикаль 22, сегмент 318										
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	19.06	30.06	9.07	20.07	
$T_{LS}, ^\circ\text{C}$	–	–	2.40	3.00	4.10	4.50	6.10	8.50	7.20	11.20	
Прогноз, $^\circ\text{C}$	–	–	3.30	2.90	3.63	4.64	6.18	7.40	9.67	10.80	
$AE_S, ^\circ\text{C}$	–	–	0.90	0.10	0.47	0.14	0.08	1.10	2.47	0.40	
Пункт набл.	г/п Артыбаш, вертикаль 2, сегмент 324										
Дата	10.04	20.04	30.04	10.05	20.05	30.05	10.06	20.06	30.06	10.07	20.07
$T_{LS}, ^\circ\text{C}$	0.60	1.50	3.40	3.20	3.30	4.00	4.50	5.00	6.40	7.10	8.40
Прогноз, $^\circ\text{C}$	0.30	1.30	3.20	3.30	3.00	3.90	4.40	5.20	6.10	7.30	8.10
$AE_S, ^\circ\text{C}$	0.30	0.20	0.20	0.10	0.30	0.10	0.10	0.20	0.30	0.20	0.30

Судя по табл. 5.1, прогнозы температуры воды в поверхностном слое озера высокого качества ( $MAE_S < 1 ^\circ\text{C}$ ) были получены за весь период моделирования для следующих пунктов: г/п Артыбаш ( $MAE_S = 0,23 ^\circ\text{C}$ ), мыс Караташ ( $0,40 ^\circ\text{C}$ ), мыс Ажи ( $0,33 ^\circ\text{C}$ ), п. Яйлю ( $0,22 ^\circ\text{C}$ ), р. Б. Корбу ( $0,15 ^\circ\text{C}$ ). Показатель успешности (SF) прогнозов  $T_{LS}$  ( $SF_S = 100 \%$ , если  $AE_S < 3 ^\circ\text{C}$  и  $SF_S = 0 \%$ , если  $AE_S \geq 3 ^\circ\text{C}$ ) для всех этих пунктов равен  $100 \%$ . В трех пунктах: с. Артыбаш, р. Челюш и рейдовая вертикаль 28 Кыгинского залива, несмотря на оптимистический показатель  $SF_S = 100 \%$ , фиксируются отдельные даты с относительно большими ошибками прогноза  $T_{LS}$ . Для Кыгинского залива это – 11.06.68 ( $AE_S = 2,8 ^\circ\text{C}$ ), для с. Артыбаш – 9.07.68 ( $AE_S = 2,47 ^\circ\text{C}$ ). Что касается этих двух пунктов, то общим для них являются пониженные значения измеренных величин  $T_{LS}$  ( $9,0 ^\circ\text{C}$  на 11.06.68 в Кыгинском заливе и  $7,2 ^\circ\text{C}$  на 9.07.68 в пункте с. Артыбаш) по сравнению с соответствующими предыдущими ( $5.06.68 - 10,5 ^\circ\text{C}$  и  $30.06.68 - 8,5 ^\circ\text{C}$ ) и последующими ( $20.06.68 - 14,7 ^\circ\text{C}$  и  $20.07.68 - 11,2 ^\circ\text{C}$ ) датами наблюдений. Данное обстоятельство, согласно работам [64, 99], позволяет предположить, что указанные понижения значений  $T_{LS}$  могут быть обусловлены влиянием локальных мезомасштабных усилений скорости ветра в названных пунктах, которые не фиксируются на весьма удаленной от Кыгинского залива м/с Беле и столь же удаленной от пункта с. Артыбаш м/с Яйлю и, соответственно, не отражаются на результатах прогноза  $T_{LS}$  в этих пунктах на указанные даты (11.06.68 и 9.07.68).

На две даты, 20.06 и 29.06.68, приходятся значительные ошибки ( $AE_S = 2,43 ^\circ\text{C}$  и  $2,81 ^\circ\text{C}$ ) прогноза  $T_{LS}$  в пункте р. Челюш, что, по нашему мнению, может быть связано с занижением прогностической скорости прохождения фронта термического бара через этот

пункт в период после 11.06.1968 г. Определенную трудность в феноменологической интерпретации причины вызывает случай большой ошибки  $\Delta E_S = 3,19$  °C на 11.06.68 для рейдовой вертикали Камгинского залива при высоком качестве прогноза  $T_{LS}$  в предшествующий (с 11.05 по 21.05.68) и последующий (с 19.06 по 20.07.68) периоды.

Значительная ошибка в прогнозе  $T_{LS}$  (прогноз – 12,8 °C, измеренная величина – 9,0 °C) в период летнего нагревания (20.07.68) при прямой (устойчивой) стратификации эпилимниона получена для пункта р. Кокши. Одна из вероятных причин возникновения такой ошибки, следуя работам [64, 98] – не учет сугубо локальной, характерной для этого пункта, мезомасштабной циркуляции в приводном слое атмосферы, приводящей к местному усилению скорости ветра, которые не фиксируются в данных наблюдений на м/с Беле (расстояние между пунктом р. Кокши и м/с Беле составляет 22 км).

Малоутешительными за вторую и третью декады июня 1968 г., как видно из табл. 5.1, оказались три прогноза  $T_{LS}$  за 11.06, 20.06 и 29.06 в пункте «мыс Кырсай». Результаты прогностического расчета вертикального распределения  $T_L$  в верхнем слое озера с 01.06 по 1.08 1968 г. для этого пункта показаны на рис. 5.6.

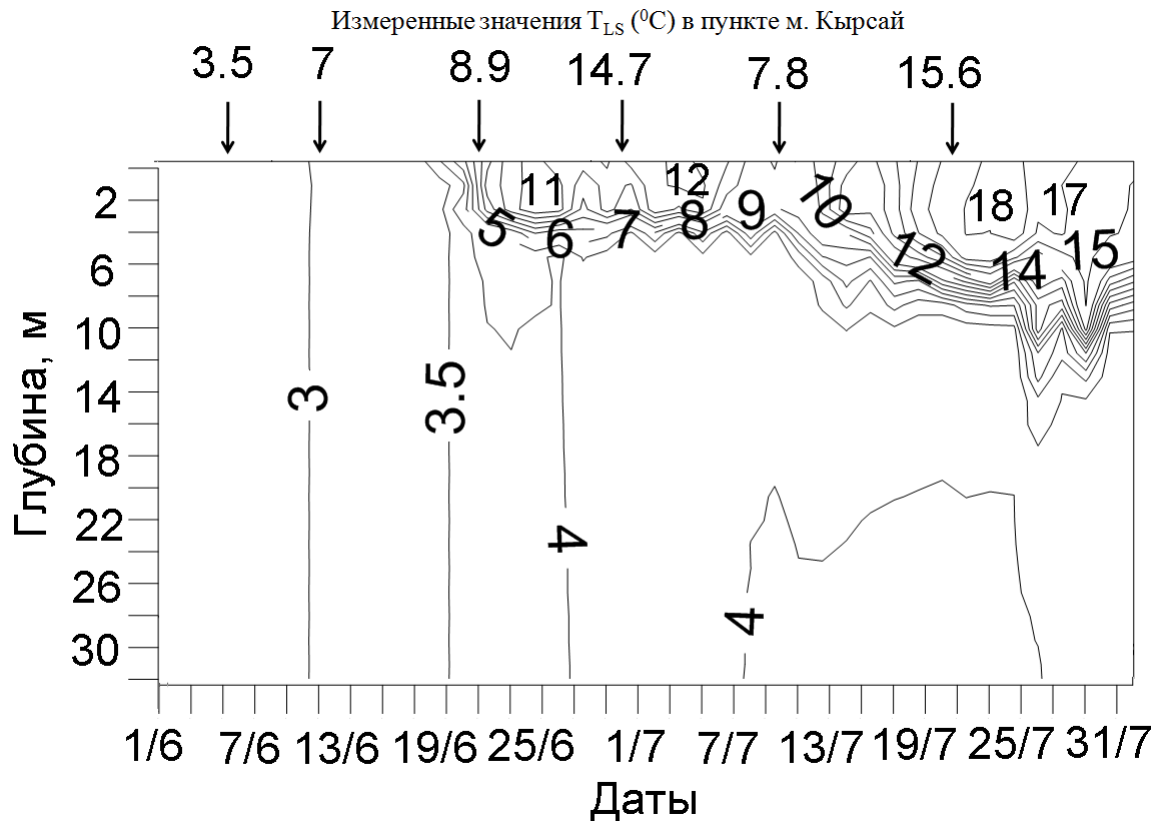


Рисунок 5.6 – Результаты расчета временной изменчивости вертикального распределения температуры воды (°C) от поверхности до глубины 32 м в сегменте 103 (м. Кырсай) за июнь – июль 1968 г. В верхней части рисунка приведены измеренные значения  $T_{LS}$  за период с 05.06 по 20.07 1968 г.

В данном пункте первая значительная ошибка прогноза  $T_{LS}$  ( $AE_S = 3,96$  °C), зафиксированная 11.06.68, обусловлена, по нашему мнению, поздним прохождением фронта прогностического РТБ. Причин такой ошибки может быть, по меньшей мере – две. Первая из них, возможно, связана с тем, что в районе м. Кырсай ширина Телецкого озера оказывается максимальной (около 5,2 км) и исходное требование, при котором были получены уравнения модели W2 (см. уравнения (1) – (6) в разделе 2.1.1, главы 2), – существенное превышение характерного горизонтального масштаба по длине водоема над соответствующим поперечным масштабом, может оказаться нарушенным именно для южной оконечности меридиональной части озера. Другими словами, участок озера от устья р. Чулышмана до гидрологического разреза «мыс Кырсай», включая Кыгинский залив, является скорее морфометрически трехмерным, нежели двумерным, как это предполагается в поперечно – осредненной модели W2.

Вторая возможная причина заключается в пренебрежении силой Кориолиса в модели W2, которая, как это показано в работе [99], приводит к эффекту ускоренного продвижения фронта РТБ за счет формирования под ее действием струеобразного «прижимного» течения вдоль правого берега (в нашем случае – вдоль восточного берега) меридионально ориентированного водоема. Радикальным вариантом устранения указанных недостатков модели W2 может быть переход к какому-либо варианту трехмерной модели, например, GEMSS [112]. Альтернативный вариант – модификация сетки PC2 с целью устранения ошибок прогноза скорости перемещения фронта РТБ на участке Br5.

Что касается ошибки прогноза  $T_{LS}$  в пункте «мыс Кырсай» на 20.06.68 – с превышением прогностического (12,2 °C) над фактическим (8,9 °C) значениями на 3,3 °C, то она может быть связана с указанным выше замедленным перемещением прогностического фронта РТБ, когда происходит фиктивный перегрев «модельного» объема воды, следующего непосредственно за фронтом РТБ, за счет теплообмена на поверхности раздела «вода – воздух» (см. рис. 5.6). Превышение фактической  $T_{LS}$  (14,7 °C) над прогностической (11,4 °C) 29.06.68 на 3,3 °C может быть обусловлено неудовлетворительной аппроксимацией на сетке PC2 области обширного мелководья, примыкающей к устью протоки Чебачья (левый рукав реки Чулышман), впадающей в Телецкое озеро с западного берега вблизи мыса Кырсай. Так или иначе, высказанные здесь соображения о возможных причинах значительных ошибок прогноза  $T_{LS}$  на 11.06, 20.06 и 29.06.68 в пункте мыс Кырсай носят характер предположений, которые должны быть уточнены при дальнейших исследованиях.

В приложении А приведена табл. А.1, которая содержит абсолютные ошибки прогноза температуры воды в придонном слое озера ( $AE_B$ ) для каждого из 11 пунктов наблюдений за период с 18.04 по 20.07 1968 г.

Основываясь на анализе рис. 5.2 – 5.5 и табл. А.1 прогнозы придонной температуры воды для всех 11 пунктов наблюдений за апрель – июль 1968 г. можно оценить как вполне успешные. Определенную трудность в феноменологической интерпретации причины вызывает единственный случай значительной ошибки  $AE_B = 1,42 \text{ } ^\circ\text{C}$  в период летнего нагревания (9.07.68) для пункта с. Артыбаш при высоком качестве прогноза  $T_{LB}$  в этом пункте в предшествующие (с 11.05 по 30.06.68) и последующий (20.07) сроки наблюдений, что подтверждается рис. 5.7.

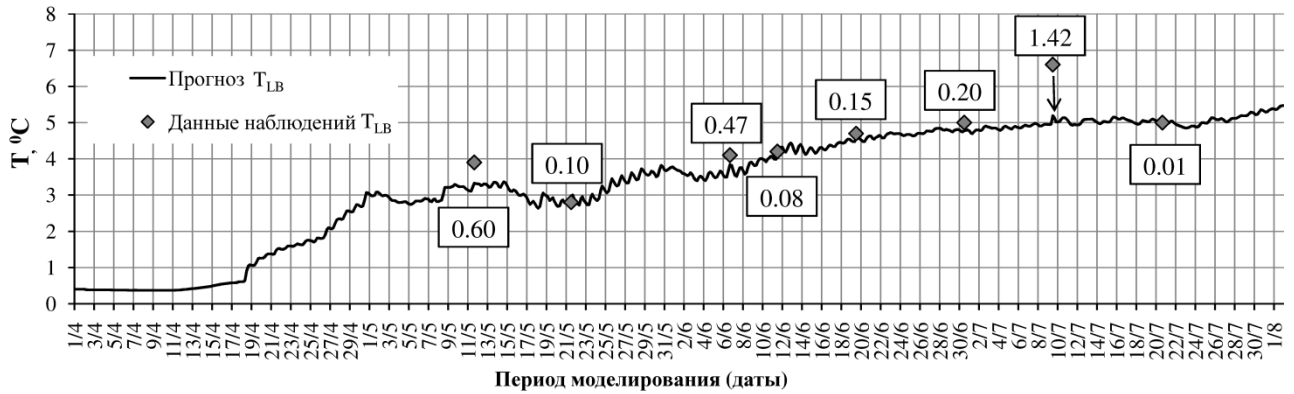


Рисунок 5.7 – Временной ряд придонной температуры воды Телецкого озера на рейдовой вертикали № 22 (с. Артыбаш) с 01.04 по 01.08.1968 г. Кривые – прогностические значения, ромбы – данные наблюдений. В прямоугольниках цифрами указаны абсолютные ошибки прогнозов  $T_{LB}$  ( $^\circ\text{C}$ )

Информация о средних за период с 18.04 по 20.07 1968 г. значениях  $MAE_S$  и  $MAE_B$  в каждом пункте измерения, а также о средних величинах показателей успешности (SF) прогноза  $T_L$  ( $SF_S = 100 \%$ , если  $AE_S < 3 \text{ } ^\circ\text{C}$ ,  $SF_B = 100 \%$ , если  $AE_B < 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  $SF_S$  и  $SF_B$ , соответственно, равны  $0 \%$ , если  $AE_S \geq 3 \text{ } ^\circ\text{C}$  и  $AE_B \geq 1 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) по всем 11 пунктам наблюдений представлена в наглядной форме на рис. 5.8.

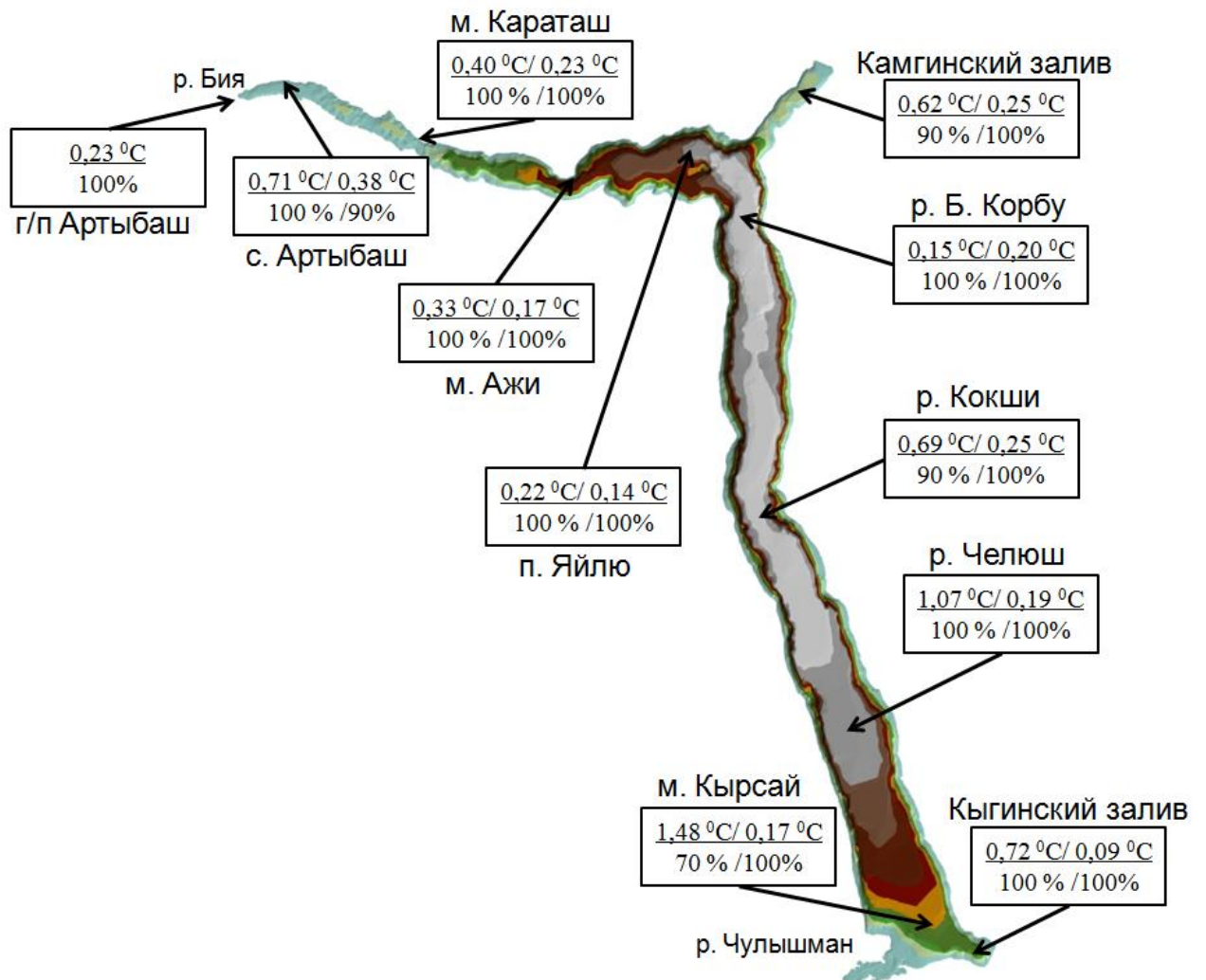


Рисунок 5.8 – Информация о средних значениях абсолютных ошибок прогноза  $T_L$  (верхняя строка –  $MAE_S / MAE_B$ , °C) и средних значениях показателя успешности прогноза (нижняя строка –  $SF_S / SF_B$ , %) по 11 пунктам наблюдений Озерной станции ЗС УГМС с апреля по июль 1968 г.

Итоговые значения средних ошибок прогнозов  $T_{LS}$  для всех пунктов наблюдений за апрель – июль 1968 г. (всего оценено 103 прогноза) составили:  $ME_S = 0,10$  °C,  $MAE_S = 0,59$  °C и  $RMSE_S = 0,89$  °C, при средней величине  $SF_S = 95$  %.

Итоговые значения средних ошибок прогнозов  $T_{LB}$  для всех пунктов наблюдений за апрель – июль 1968 г. (всего оценен 91 прогноз) составили:  $ME_B = -0,05$  °C,  $MAE_B = 0,20$  °C и  $RMSE_B = 0,27$  °C, при средней величине  $SF_B = 99$  %.

## 5.2 Качественное и количественное сравнение расчетных и измеренных вертикальных профилей температуры воды Телецкого озера

Для оценки прогностических возможностей модели W2 по численному воспроизведению вертикальных неоднородностей температуры воды Телецкого озера был проведен сопоставительный анализ результатов расчетов ЧЭ Ш.1 с данными измерений

вертикального распределения  $T_L$  от поверхности озера до дна для всех 11 пунктов наблюдений за апрель – июль 1968 года [44].

Для предварительного количественного сопоставления результатов расчетов и данных наблюдений  $T_L$  на средних горизонтах измерений ( $H_{cp}$ ) двух рейдовых вертикалей № 26 (р. Б. Корбу) и № 6 (п. Яйлю) Телецкого озера за период с 01.04 по 01.08.1968 г., по аналогии с рис. 5.3 и 5.4, построены рис. 5.13 и 5.14.

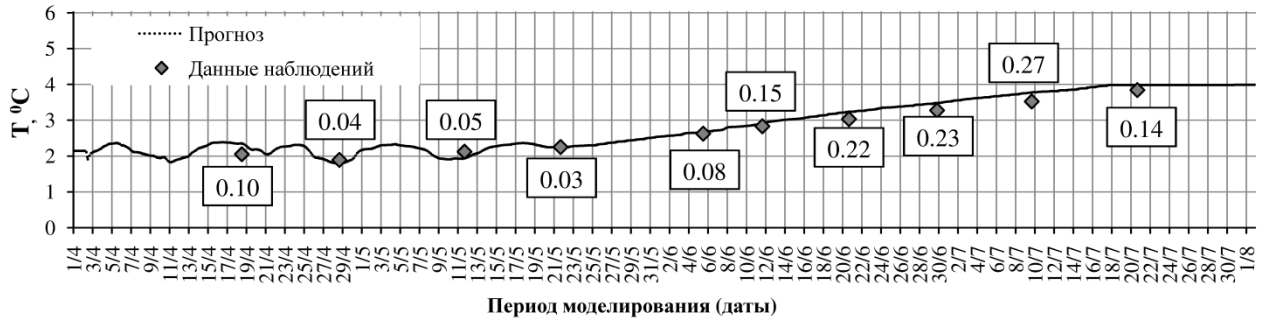


Рисунок 5.13 – Временной ряд температуры воды Телецкого озера на среднем горизонте измерения рейдовой вертикали № 26 (р. Б. Корбу,  $H_{cp} = 160$  м) с 01.04 по 01.08.1968 г. Кривая – прогностические значения, ромбы – данные наблюдений. В прямоугольниках цифрами указаны абсолютные ошибки прогнозов  $T_L$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

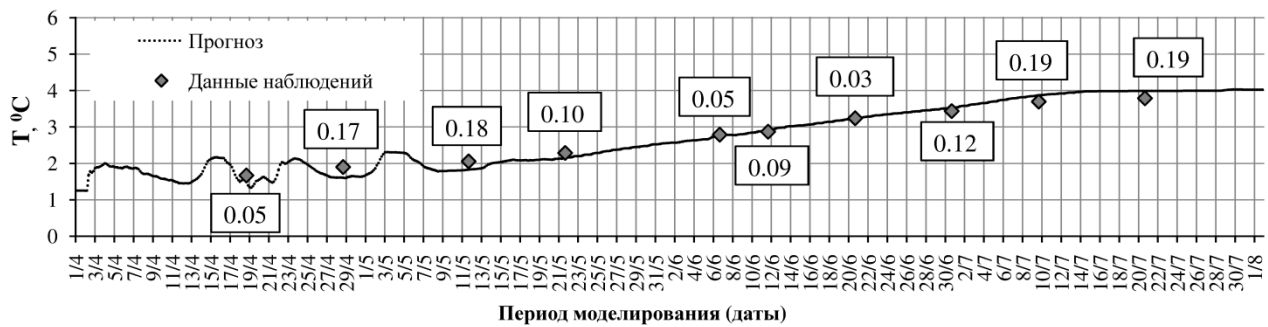


Рисунок 5.14 – Временной ряд температуры воды Телецкого озера на среднем горизонте измерения рейдовой вертикали № 6 (п. Яйлю,  $H_{cp} = 120$  м) с 01.04 по 01.08.1968 г. Кривая – прогностические значения, ромбы – данные наблюдений. В прямоугольниках цифрами указаны абсолютные ошибки прогнозов  $T_L$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

Полный набор абсолютных ошибок прогноза температуры воды на средних горизонтах измерений для всех пунктов наблюдений за апрель – июль 1968 г. содержит табл. А.2 (см. приложение А).

Основываясь на анализе табл. А.2 и рис. 5.13 и 5.14, прогнозы  $T_L$  на средних горизонтах измерений для всех 11 пунктов наблюдений за апрель – июль 1968 г. можно оценить как вполне успешные, поскольку максимальные значения  $AE_m$  не превышают  $1^{\circ}\text{C}$ . Итоговые средние ошибки прогнозов  $T_L$  на средних горизонтах измерений для всех пунктов наблюдений за апрель – июль 1968 г. (оценен 91 прогноз) составили:  $ME = 0,03^{\circ}\text{C}$ ,  $MAE = 0,15^{\circ}\text{C}$ ,  $RMSE = 0,20^{\circ}\text{C}$ , при средней величине  $SF_m$  (которая рассчитывалась также, как  $SF_B$ ) равной 100 %.

Общее качественное представление о характерных особенностях пространственно-временной изменчивости фактической и расчетной термической стратификации озера в периоды весеннего и летнего нагревания дают рис. 5.9 – 5.12. На этих рисунках показаны примеры прогностических вертикальных профилей температуры воды Телецкого озера в сравнении с данными измерений [44] для характерных лимнообластей водоема: южной и северной частей меридионального участка озера (соответственно, м. Кырсай – рейдовая вертикалей 19, сегмент 103 и р. Б. Корбу – вертикаль 26, сегмент 145) и восточной и западной частей широтного участка озера (соответственно, п. Яйлю, вертикаль 6, сегмент 224 и с. Артыбаш вертикаль 22, сегмент 318). Следует отметить, что ранее качественное сравнение результатов расчетов вертикальных профилей  $T_L$  с данными наблюдений для рейдовой вертикали № 26 (р. Б. Корбу), за интересующий нас период времени, проводилось в работах В.И. Квона и соавторов [34, 35, 37].

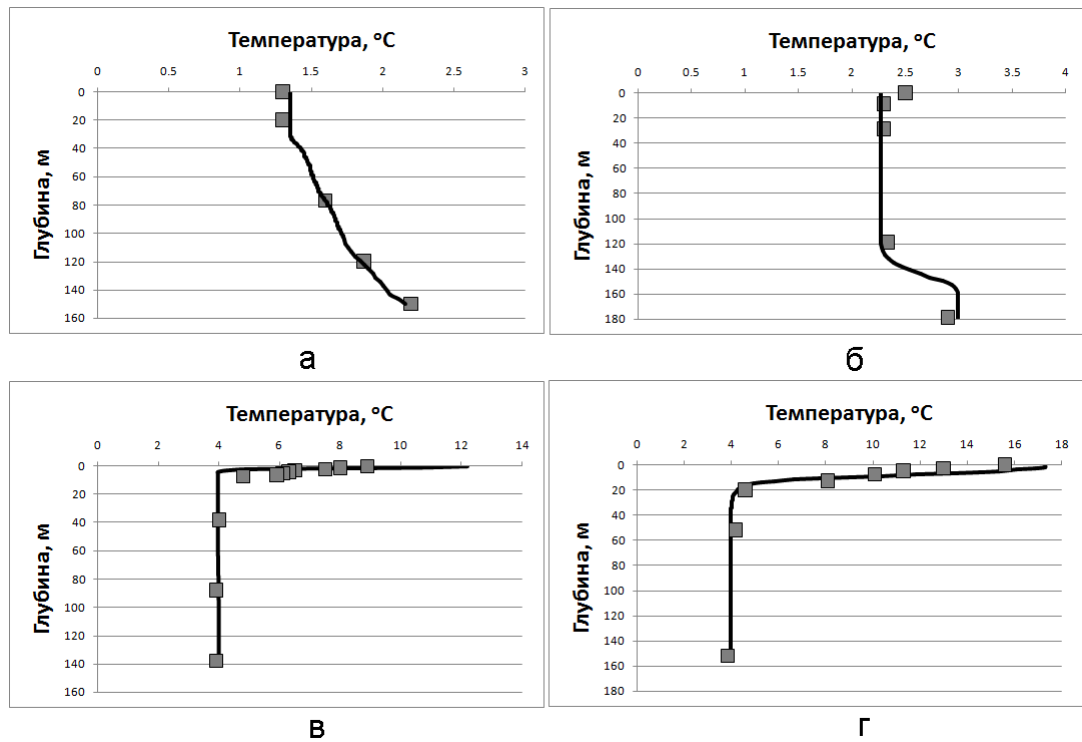


Рисунок 5.9 – Сопоставление вычисленных (кривые) и измеренных (квадратики) вертикальных профилей температур воды Телецкого озера ( $^{\circ}\text{C}$ ) на рейдовой вертикали № 19 (м. Кырсай): а) 18.04.1968, б) 21.05.1968, в) 20.06.1968, г) 20.07.1968



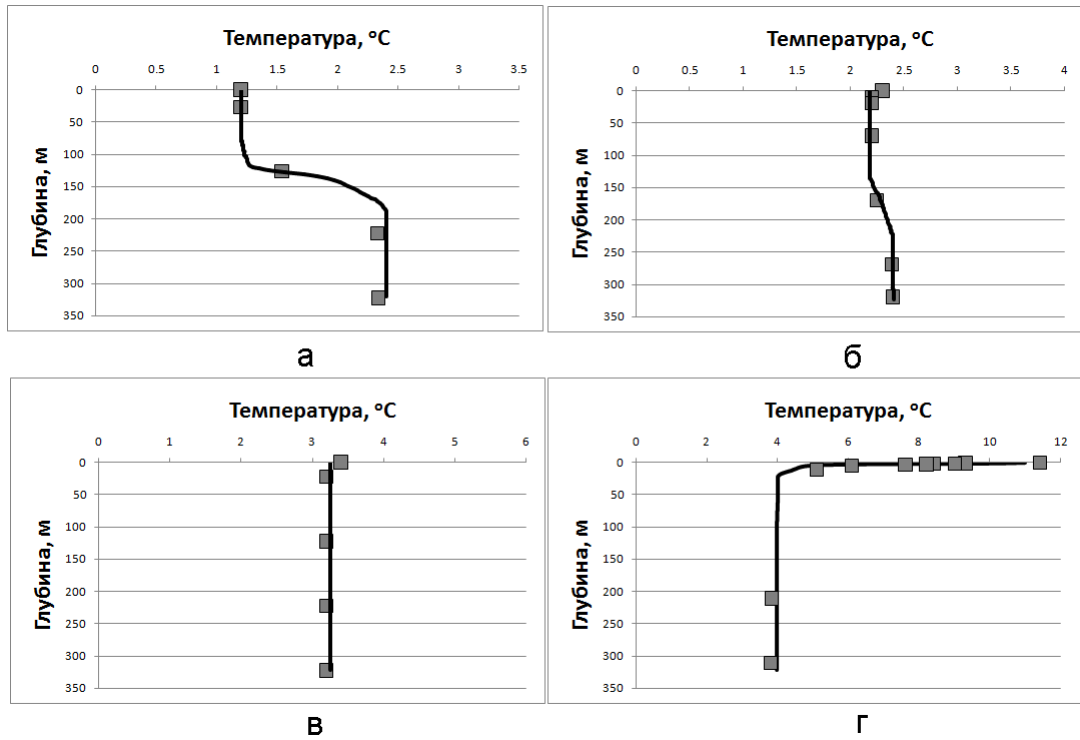


Рисунок 5.10 – Сопоставление вычисленных (кривые) и измеренных (квадратики) вертикальных профилей температур воды Телецкого озера ( $^{\circ}\text{C}$ ) на рейдовой вертикали № 26 (р. Б. Корбу): а) 18.04.1968, б) 21.05.1968, в) 20.06.1968, г) 20.07.1968

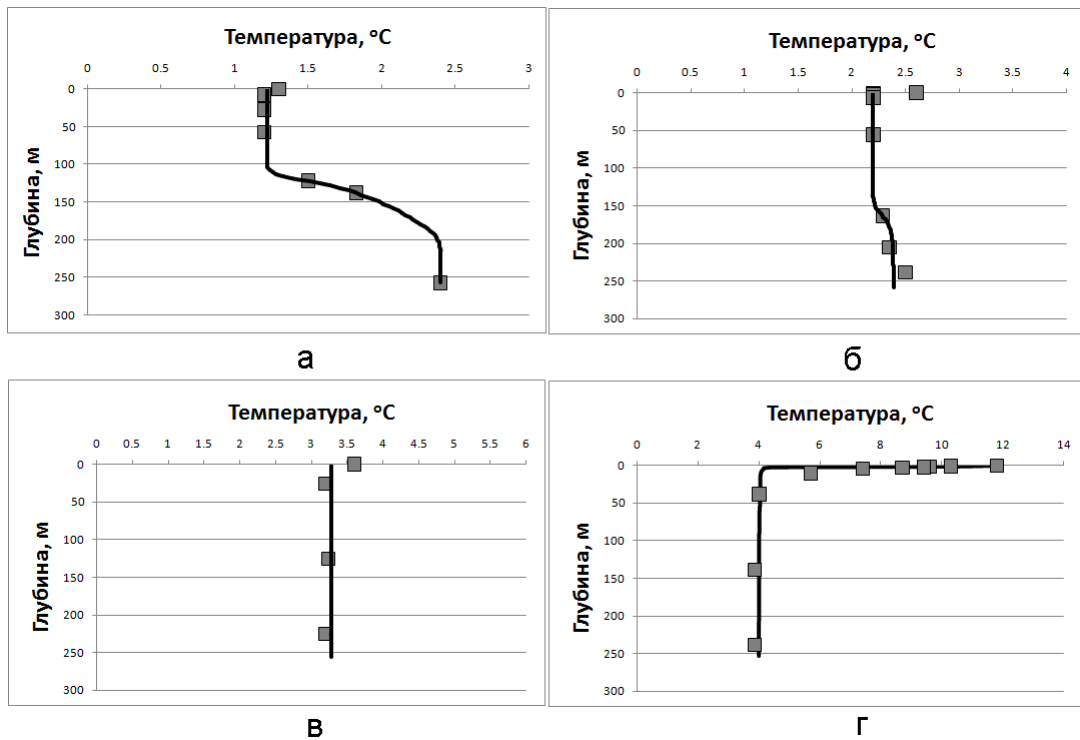


Рисунок 5.11 – Сопоставление вычисленных (кривые) и измеренных (квадратики) вертикальных профилей температур воды Телецкого озера ( $^{\circ}\text{C}$ ) на рейдовой вертикали № 6 (п. Яйлю): а) 18.04.1968, б) 21.05.1968, в) 20.06.1968, г) 20.07.1968

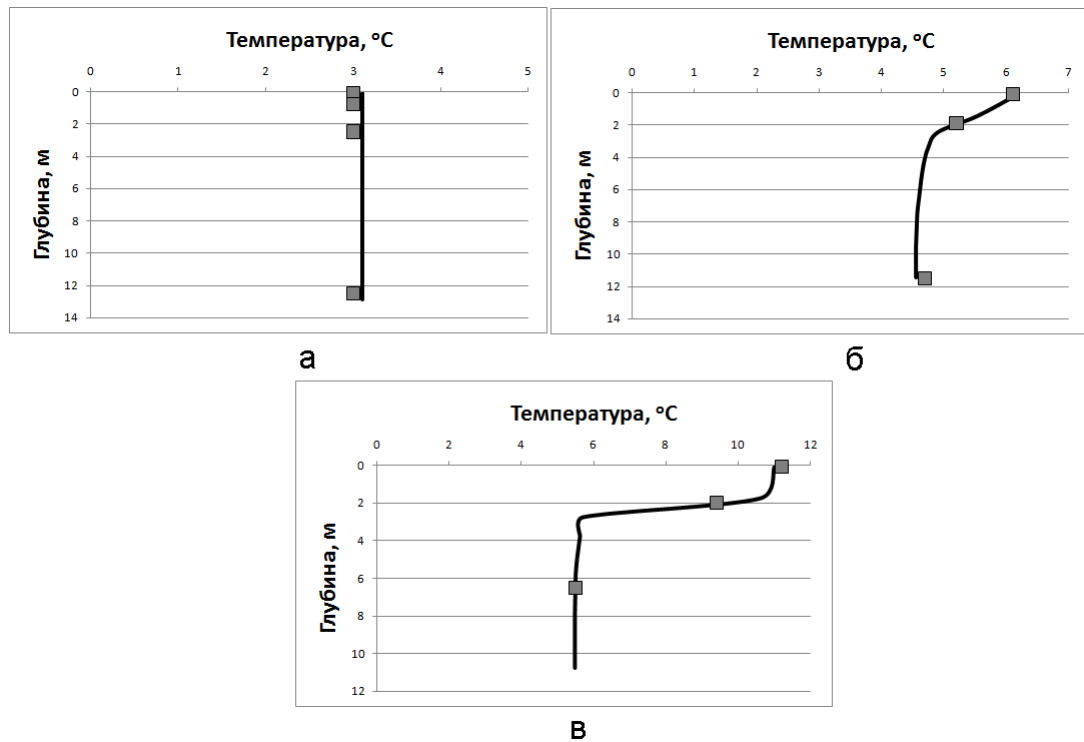


Рисунок 5.12 – Сопоставление вычисленных (кривые) и измеренных (квадратики) вертикальных профилей температур воды Телецкого озера ( $^{\circ}\text{C}$ ) на рейдовой вертикали № 22 (с. Артыбаш): а) 21.05.1968, б) 19.06.1968, в) 20.07.1968

Рисунки 5.9 – 5.11 позволяют относительно легко идентифицировать, хорошо изученную экспериментально [64], базовую сезонную изменчивость термической стратификации глубоководной части Телецкого озера в пунктах наблюдений: мыс Кырсай, р. Б. Корбу и п. Яйлю. Так в начальный период весеннего нагревания (18.04.1968 г.) в верхних слоях водоема, как по данным наблюдений, так и по результатам расчетов (см. фрагменты а рис. 5.9 – 5.11) формируется гомотермия, обусловленная, прежде всего, эффективно действующей проникающей турбулентной конвекции, порожденной плотностной неустойчивостью за счет объемного радиационного нагревания фотической зоны при  $T_L < T_{md}$ . Стратификация глубинных слоев в этот период оказывается близкой к начальной стратификации, заданной в модели по фактическим данным за 01.04.1968 года (см. табл. 2.1). При дальнейшем весеннем нагревании температура слоя гомотермии возрастает, а его нижняя граница проникает в слой с обратной (устойчивой) стратификацией. Это хорошо видно на фрагментах б рис. 5.9 – 5.11, где к 21.05.1968 г. слой гомотермии с  $T_L$  близкой к  $2,3^{\circ}\text{C}$  достигает глубин 130 – 150 м. Заглубление слоя гомотермии с  $T_L$  близкой к  $3,3^{\circ}\text{C}$  до дна озера фиксируется 20.06.1968 г. данными наблюдений и успешно воспроизводится моделью в пунктах р. Б. Корбу и п. Яйлю (см. фрагменты в рис. 5.10 и 5.11). В тоже время, т.е. 20.06.1968 г., фактическая и расчетная стратификация озера в пункте м. Кырсай (фрагмент в рис. 5.9) оказывается близкой к типично летней (для сравнения см. фрагмент г рис. 5.9) и двухслойной. В верхнем слое толщиной около 10 м стратификация в этом пункте

оказывается сильно устойчивой и ниже до дна водоема – нейтральной со средней температурой близкой к  $T_{md}$ . Формирование данного типа стратификации является следствием прохождения через пункт м. Кырсай речного термического бара в конце первой декады июня 1968 г. Это, в частности, сопровождается горизонтальным переносом в тонкий поверхностный слой «столба воды» пункта м. Кырсай хорошо прогретых вод реки Чулышман. Именно такой тип стратификации наблюдается 20.07.1968 г. в пункте р. Б. Корбу (см. фрагмент г рис. 5.10) после прохождения через него речного термического бара и в пункте п. Яйлю (см. фрагмент г рис. 5.11) после прохождения через него озерного термического бара.

На северо-западном мелководье весенний тип стратификации при  $T_L < T_{md}$  (фрагмент а рис. 5.12) 20.05.1968 г. представлен хорошо выраженным слоем гомотермии с  $T_L$  близкой к  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  (измерения 18.04.1968 г. в пункте с. Артыбаш не проводились). Тип стратификации, который устанавливается на мелководье к 20.07.1968 г., как по данным измерений, так и расчетов (фрагмент в рис. 5.12) весьма близок к классической трехслойной схеме летней термической стратификации димиктических озер [64, 78] и характеризуется наличием эпилимниона (от поверхности до глубины 2 м), металимниона (толщиной менее 2 м) и гиполмниона (толщиной 7 м).

В заключение данной главы отметим, что результаты прогностических расчетов значений  $T_L$  за период с 1 апреля по 1 августа 1968 года в целом качественно и количественно согласуются с данными наблюдений Озерной станции ЗС УГМС и верно воспроизводят основные особенности динамики термического режима и циркуляции Телецкого озера в периоды весеннего и летнего нагревания, описанные в феноменологических моделях Селегея [64] и Кармака [98]. Итоговые средние ошибки прогнозов температуры воды в поверхностном, среднем и придонном слоях Телецкого озера для всех пунктов наблюдений за апрель – июль 1968 г. (всего оценено 285 прогнозов) составили:  $ME = 0,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $MAE = 0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $RMSE = 0,50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Результаты численного моделирования гидротермодинамического режима Телецкого озера при прямом учете внутрисуточной и синоптической изменчивости переменных метеорологических и гидрологических внешних воздействий являются новыми, если сравнивать их с результатами, опубликованными в работах [33–37, 135, 136].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К числу основных результатов, полученных в НИР при последовательном применении метода прикладного системного анализа лимнологического-гидрологического объекта в составе: устьевой участок р. Чулышман – Телецкое озеро (включая Кыгинский и Камгинский заливы) с основными наиболее крупными боковыми притоками – исток р. Бии, можно отнести следующее:

1. Сформирован 4-х компонентный (препроцессор – WMS, базовая прогностическая численная модель – CE-QUAL-W2, постпроцессор – W2i-AGPM и тематическая БД) информационно-вычислительный комплекс, позволяющий для заданных начальных и граничных условий проводить с высоким пространственно-временным разрешением расчеты уровня поверхности воды, продольной и вертикальной составляющих скорости течения, температуры воды, толщины льда Телецкого озера при различных сценариях задания параметров, описывающих внешние метеорологические и гидрологические воздействия. Обоснована модульная структура и описаны функциональные возможности и ограничения ИВК «Телецкое озеро». Разработана технология и представлены результаты автоматизированной генерации файла батиметрии Телецкого озера и устьевое участка реки Чулышман.

2. Впервые с помощью ИВК «Телецкое озеро» и анализа работ по феноменологическому моделированию глубоких межгорных озер воспроизведены и теоретически обоснованы характерные особенности гидротермодинамики (плотностная склоновая струя и речной термический бар) южной части Телецкого озера в период весеннего половодья на реке Чулышман.

3. Численно исследованы процессы и описаны механизмы формирования, перемещения и слияния речного и озерного термических баров Телецкого озера и локальных термобаров смешанной природы в Камгинском и Кыгинском заливе в период весенне-летнего нагревания. Теоретически подтверждены известные из литературы результаты теплосбалансовых расчетов по данным натуральных наблюдений, согласно которым радиационно-турбулентный теплообмен на поверхности водоема дает основной вклад в тепловой баланс озера в этот период. Вместе с тем, на основе анализа чувствительности ИВК «Телецкое озеро», установлено, что реки Чулышман и Бия в период весенне-летнего половодья в значительной мере контролируют циркуляционные структуры и определяют термодинамический режим Телецкого озера. Проведены качественная и количественная оценки ветрового воздействия на термический режим водоема. Локальные термические бары в Кыгинском и Камгинском заливах воспроизведены впервые.

4. Проведен детальный интерпретационно-сопоставительный анализ результатов прогностических расчетов температуры воды с данными наблюдений на всех 11 пунктах Озерной станции ЗС УГМС за период с 1 апреля по 1 августа 1968 г. Показано, что ИВК «Телецкое озеро» обладает значительным прогностическим потенциалом, качественно и количественно верно воспроизводит особенности реальной динамики термического режима поверхностного, среднего по глубине и придонного слоев водоема при учете фактической суточной изменчивости параметров метеорологических и гидрологических внешних воздействий.

Работа по созданию и верификации ИВК «Телецкое озеро» позволила определиться с задачами его дальнейшего развития как краткосрочными, например, разработка блока расчета параметров светового и ветрового затенения поверхности водоема от прибрежных хребтов и модификация батиметрии дельты реки Чулышман, так и перспективными, например, дополнить комплекс моделью водосборного бассейна типа «осадки-сток» и разработать новую или адаптировать известную численную негидростатическую модель динамики мезомасштабных процессов в атмосфере над акваторией и бассейном Телецкого озера.

Успешные тестовые численные эксперименты с подключением блока моделирования качества воды в составе ИВК «Телецкого озера», проведенные авторами совместно с сотрудниками ИВЭП СО РАН к.б.н В.В Кирилловым и А.В. Дьяченко, показали реальную возможность создания полноценной численной модели динамики экосистемы Телецкого озера. Однако для этого необходимо разработать феноменологическую модель гидрохимических и гидробиологических процессов Телецкого озера и провести масштабные полевые работы для создания адекватной экосистемной базы данных.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Антонцев С.Н. Системное математическое моделирование процессов водообмена / С.Н. Антонцев, Г.П. Епихов, А.А. Кашеваров. – Новосибирск : Наука, 1986. – 215 с.
2. Белолипецкий В.М. Математическое моделирование в задачах охраны окружающей среды / В.М. Белолипецкий, Ю.И. Шокин ; отв. ред. Г.А. Сапожников. – Новосибирск : ИНФОЛИО-пресс, 1997. – 239 с.
3. Бочаров О.Б. Математическое моделирование термобара в глубоком озере / О.Б. Бочаров, О.Ф. Васильев, В.И. Квон // ДАН. – 1996. – Т. 349, № 4. – С. 530–532.
4. Бочаров О.Б. О влиянии сжимаемости воды на развитие естественной термогравитационной конвекции в прибрежной зоне глубокого озера в весенне-летний период / О.Б. Бочаров, О.Ф. Васильев, Т.Э. Овчинникова // ДАН. – 1999. – Т. 366, № 1. – С. 111–115.
5. Бочаров О.Б. Численное исследование гидротермических процессов и процессов переноса в глубоких водоемах / О.Б. Бочаров, О.Ф. Васильев, В.И. Квон, Т.Э. Овчинникова // Сибирский экологический журнал. – 2003. – Т. 10, № 2. – С. 221–230.
6. Бояринов П.М. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов / П.М. Бояринов, М.П. Петров ; отв. ред. Н.Н. Филатов – Л. : Наука, 1991. – 175 с.
7. Булгаков Н.П. О явлении уплотнения при смешении вод / Н.П. Булгаков // Изв. АН СССР. – 1960. Вып. 2. – С. 346–352.
8. Васильев О.Ф. Комплексные исследования экосистемы Телецкого озера / О.Ф. Васильев, В.В. Кириллов, Я. Клеркс, В.В. Селегей // Гидрологические и экологические процессы в водоемах и их водосборных бассейнах: Мат. междунар. симп. – Новосибирск : Изд-во СО РАН. – 1995. – С. 120–122.
9. Васильев О.Ф. Математическое моделирование гидравлических и гидрологических процессов в водоемах и водотоках (обзор работ, выполненных в Сибирском отделении Российской Академии Наук) / О.Ф. Васильев // Водные ресурсы. – 1999. – Т. 26, № 5. – С. 600–611.
10. Васильев О.Ф. Озеро Телецкое - особенности лимнологической системы: история и перспективы исследования / О.Ф. Васильев, В.В. Селегей, В.В. Кириллов // Байкал - природная лаборатория для исследования изменения окружающей Среды и климата. : тез. докл. [совещания], Иркутск, Россия, 11-17 мая 1994 г. – Иркутск : Лисна. – 1994. – Т. 6. С. 50.

11. Васильев О.Ф. Создание систем оперативного прогнозирования половодий и паводков / О.Ф. Васильев // Вестник Российской Академии Наук. –2012. – Т 82, № 3. – С. 237–242.
12. Введение в экологическое моделирование / А.А. Цхай, М. Пулян, Л.Н. Бельдеева [и др.]. ; науч. ред. А.А. Цхай, М. Пулян ; Комис. Европ. Сообществ, Программа ТЕМПУС/ТАСИС, Междунар. каф. ЮНЕСКО "Экол. образование в Сибири при Алт. гос. техн. ун-те. – Барнаул : Азбука, 2001. – 315 с.
13. Водные ресурсы и качество вод: состояние и проблемы управления / ред. В. И. Данилов-Данильян ; Институт водных проблем. – М. : РАСХН, 2010. – 414 с.
14. Данчев В.Н. «Анализ чувствительности экосистемы глубокого водоема к изменчивости параметров геофизического форсинга на основе применения модели SEQUAL-W2» / В.Н. Данчев // Материаловедение, технологии и экология в 3-м тысячелетии : материалы IV Всерос. конф. молодых ученых, Томск, 19-21 окт. 2009 г. – Томск, 2009. – С. 414–418.
15. Данчев В.Н. «Выбор информационно-вычислительной основы с целью исследования динамики водной экосистемы Телецкого озера с учетом процессов на площади водосбора» / В.Н. Данчев // Проблемы географии Урала и сопредельных территорий : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Челябинск, 20-22 мая 2010 г. – Челябинск : АБРИС, 2010. – С. 43–54.
16. Данчев В.Н. Опыт разработки и результаты применения информационно-вычислительного комплекса для моделирования гидродинамики и качества воды рек и водоемов бассейна Оби. Часть 2 - Телецкое озеро и участок реки Чулышман / В.Н. Данчев, П.Ю. Пушистов // Вестн. Бурят. гос. ун-та. – 2012. – Вып. 9. – С. 154–161
17. Данчев В.Н. Разработка 2.5 - D модели гидрологического и термического режимов Телецкого озера с учетом боковой приточности и нестационарного метеорологического форсинга на площади водосбора / В.Н. Данчев // Проблемы рационального природопользования : материалы VII открытой науч.-практ. конф. Института природопользования Югорского государственного университета, Ханты-Мансийск, 25 марта 2011 г. – Ханты-Мансийск: ОАО «Информационно-издательский центр», – 2011 г. – С 47–49.
18. Демченко Н. Ю. Исследование структуры и динамики термобара в пресных и солоноватых водоемах, – автореферат диссертации на соискание учёной степени канд. физ.-мат. наук : 25.00.28 / Н.Ю. Демченко. – Калининград, 2008. – 24 с.
19. Ермакова Н.Н. ГИС "ТЕЛЕЦКОЕ ОЗЕРО" / Н.Н. Ермакова, А.А. Цхай // Ползунов. альм. – 2000. – №4. – С. 99–102.

20. Ефремов А. Телецкое озеро - проблемы туризма // Медвежий угол : электрон. журн. – 2007. – № 7. URL : <http://ecoclub.nsu.ru/isar/mu7/5.html> (дата обращения: 15.07.2012).
21. Зарубина Е.Ю. Гидрохимический режим приустьевых участков притоков Телецкого озера / Е.Ю. Зарубина, Л.А. Долматова, М.И. Соколова // Ползуновский вестник. – 2006. – № 2-1. – С. 279–285.
22. Земцов В.А. Компьютерное моделирование речной динамики как элемент системы поддержки принятия решений (на примере крупных рек Сибири) / В.А. Земцов, Д.А. Вершинин, Инишев Н.Г., Мезенцев А. В. // Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения : [Всерос. конф.] : сб. науч. тр. – Барнаул, 2009. – С. 489–502.
23. Земцов В.А. Русловые и пойменные процессы рек Сибири : учеб. пособие для студентов / В.А. Земцов, Д.А. Вершинин, А.О. Крутовский, Ю.И. Каменсков. – Томск : ТМЛ-Пресс, 2007. – 182 с.
24. Зилитинкевич С.С. Термический бар / С.С. Зилитинкевич, А. Ю. Тержевик // Океанология. – 1987. – Т. 27, №5. – С. 732 –738.
25. Зилитинкевич С.С. Поправка к статье «Термический бар» / С.С. Зилитинкевич, А. Ю. Тержевик // Океанология. – 1989. – Т. 29, Вып. 5. – С. 755–758.
26. Зиновьев А.Т. Комплексные исследования Телецкого озера: термический режим, гидрохимические и гидробиологические характеристики / А.Т. Зиновьев, Е.Ю. Митрофанова, Е.И. Третьякова [и др.]. // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии : тр. Всерос. науч. конф. с междунар. участием, посвящ. 25-летию юбилею Ин-та водных и экол. проблем СО РАН, 20-24 авг. 2012 г., Барнаул : [в 3 т. / редкол.: Васильев О. Ф. [и др.]. – Барнаул: ООО «Пять плюс», 2012. – Т. 1. С. 43–47.
27. Зиновьев А.Т. Моделирование ледотермического режима Телецкого озера / А.Т. Зиновьев // Гидрологические и экологические процессы в водоемах и их водосборных бассейнах» : Мат. междунар. симп. – Новосибирск : Изд-во СО РАН. – 1994. – С. 34
28. Зиновьев А.Т. Моделирование температурной стратификации Телецкого озера / А.Т. Зиновьев // Основные закономерности глобальных и региональных изменений климата и природной среды в позднем кайнозое Сибири. – Новосибирск: Изд-во ИАЭ СО РАН. – 2002. – Вып. 1. – С. 212–216.
29. Зиновьев А.Т. Температурный режим Телецкого озера: моделирование и эксперимент / А.Т. Зиновьев, К.Б. Кошелев, К.В. Марусин // Мир науки, культуры, образования. – 2010. – № 6. – С. 285–289.
30. Иванов В.Г. Формирование и эволюция весеннего термобара за счет стока реки (на примере Селенгинского мелководья озера Байкал) : автореферат диссертации на соискание учёной степени канд. геогр. наук : 25.00.27 / В.Г. Иванов. – Иркутск, 2012. 24 с.



31. Интегрированное управление водными ресурсами Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Опыт создания системы поддержки принятия решений / Российская академия наук. Санкт-Петербургский Научный центр; под ред .А. Ф. Алимова [и др.]. – СПб. : Borey Print, 2001. – 419с
32. Квон В.И. Численный анализ механизма глубокого проникновения поверхностных вод в прибрежной зоне озера в период весеннего термобара / В.И. Квон, Д.В. Квон // Вычислительные технологии. – 1997. – Т. 2 , №5. – С. 46–56.
33. Квон Д.В. Математическое моделирование гидротермических процессов в Телецком озере : автореферат диссертации на соискание учёной степени канд. физ.-мат. наук :05.13.16 / Д.В. Квон. – Барнаул, 1998. 21 с.
34. Квон Д.В. Математическое моделирование сезонных изменений температуры воды в Телецком озере / Д.В. Квон // Вычислительные технологии. – 1996. – Т. 1 , №1. – С. 48–56.
35. Квон Д.В. Численный расчет продольно-вертикальной термической структуры Телецкого озера в годовом цикле / Д.В. Квон, В.И. Квон, А.Н. Семчуков // Вычислительные технологии. – 2000. – Т. 5, № 3. – С. 29–45.
36. Квон Д.В. Численное моделирование гидротермических процессов в предустьевой области Телецкого озера / Д.В. Квон, В.И. Квон, Т.Н. Филатова // Вычислительные технологии. – 2000. – Т. 5, № 3. – С. 68–77.
37. Квон Д.В. Численный расчет стоковых и термогравитационных течений в Телецком озере / Д.В. Квон, В.И. Квон // Метеорология и гидрология. – 1998. – №6. – С. 68–76.
38. Кириллова Т.В. Вертикальное распределение и межгодовая динамика пигментных характеристик фитопланктона Телецкого озера / Т.В. Кириллова // Мир науки, культуры, образования. – 2008. – №1(8). – С. 4–9.
39. Ковешников М.И. Зообентос литорали Телецкого озера. / М.И. Ковешников, Е.Н. Крылова //Ползуновский вестник. – 2004. – №2. – С. 162–169.
40. Ковешников М.И. Типизация сообществ донных беспозвоночных Телецкого озера и оценка качества воды по зообентосу / М.И. Ковешников, Е.Н. Крылова // Мир науки, культуры, образования. – 2011. – № 5 (30). – С. 241–247.
41. Кузин В.И. Моделирование гидрофизических процессов в Аральском море / В.И. Кузин, Е.Н. Голубева // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11. – С. 60–66.
42. Ладожское озеро – прошлое, настоящее, будущее / под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Драбковой. – СПб. : Наука, 2002. – 327 с.

43. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И. Марчук. – М : Наука, 1982. – 320 с.
44. Материалы наблюдений на озерах и водохранилищах. Дополнение к Гидрологическому ежегоднику, 6, вып. 0. Главное управление гидрометеорологической службы при СМ СССР, Западно-Сибирское управление гидрометеорологической службы, озерная станция Яйлю, 1968.
45. Митрофанова Е.Ю. Состав и количество диатомовых водорослей в поверхностном слое донных отложений меридиональной части Телецкого озера / Е.Ю. Митрофанова, В.В. Кириллов, И.А. Старцева // Проблемы реконструкции климата и природной среды голоцена и плейстоцена Сибири. – Вып. 3. – Новосибирск : Изд-во Ин-та археологии и этнографии СО РАН, 2002. – С. 344–349.
46. Митрофанова Е.Ю. Фитопланктон Телецкого озера: особенности состава, структуры и пространственно-временной неоднородности / Е.Ю. Митрофанова // Изучение и охрана природы Алтае-Саянской горной страны: Материалы науч. конференции. – Горно-Алтайск : АГПЗ, 2002. – С. 97–99.
47. Моделирование экосистем больших стратифицированных озер / Г.П. Астраханцев [и др.] ; под ред. Л.А. Руховца. – Спб. : Наука, 2003. – 363 с.
48. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 2: Гидрометеорологические наблюдения на постах. Ч.2. Гидрологические наблюдения на реках и озерах. – Л. : Гидрометеиздат, 1946. – 34 с.
49. Науменко М.А. Закономерности пространственно-временной изменчивости термических процессов в крупных димиктических озерах : автореферат диссертации на соискание учёной степени д-ра геогр. наук : 11.00.11 / М.А. Науменко. – СПб, 1998. 38 с.
50. Павлов В.Е. Упрощенная модель пространственного распределения содержания хлорофиллов и каротиноидов в Телецком озере / В.Е. Павлов, Т.В. Кириллова, О.В. Кованова, В.В. Кириллов // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 1. – С. 55–60.
51. Пененко В.В. Математические модели для исследования взаимодействий в системе озеро Байкал – атмосфера региона / В.В. Пененко, Е.А. Цветова // ПМТФ. – 1999. – Т.40, № 2. – С.137–147.
52. Пененко В.В. Структура комплекса моделей для исследования взаимодействий в системе “озеро Байкал–атмосфера региона” / В.В. Пененко, Е.А. Цветова // Оптика атмосферы и океана. – 1998. – Т.11, №6. – С. 586–593.
53. Пряжинская В.Г. Компьютерное моделирование в управлении водными ресурсами / В.Г. Пряжинская, Д.М. Ярошевский, Л.К. Левит-Гуревич. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 496 с.

54. Пушистов П.Ю. Интегрирование результатов экспериментальных исследований и применения информационно-вычислительного инструментария arcgis и WMS для разработки системы управления использованием и охраной водных ресурсов в бассейне реки Северная Сосьва / П.Ю. Пушистов, В.Н. Данчев, Р.Д. Романенко // Сборник материалов XI Межд. науч.-практ. симпозиума и выставки «Чистая вода России», Екатеринбург, 18-20 мая 2011 г. – Екатеринбург, 2011. – С. 107–108.

55. Пушистов П.Ю. Информационно-вычислительные комплексы водных объектов бассейна Оби. Часть 1 – ИВК «Северная Сосьва». Часть 2 – ИВК «Телецкое озеро» / П.Ю. Пушистов, В.Н. Данчев ; науч. ред. В.Н. Лыкосов., В.А. Земцов. – Saarbrücken : LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 160 с. ISBN: 978-3-659-31800-9.

56. Пушистов П.Ю. Опыт разработки и результаты применения информационно-вычислительного комплекса для моделирования гидродинамики и качества воды рек и водоемов бассейна Оби. Часть 1 - участок реки Северная Сосьва / П.Ю. Пушистов, В.Н. Данчев, Р.Д. Романенко // Вестн. Бурят. гос. ун-та. – 2012. – Вып. 9.– С. 177–184.

57. Пушистов П.Ю. Разработка электронного реестра-справочника информационно-вычислительных средств для планирования и управления системой водных ресурсов / П.Ю. Пушистов, М.Н. Вторушин, Р.Д. Романенко, В.А. Земцов // Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения: материалы Всерос. конф., Барнаул, 06-11 июля. 2009г. – Барнаул : ООО «Агентство рекламных технологий», 2009. – С. 546–557.

58. Пушистов П.Ю. Результаты применения методов системного анализа при исследовании детальной пространственно-временной структуры переменных гидродинамики и качества воды среднего течения крупной реки Северная Сосьва / П.Ю. Пушистов, М.Н. Вторушин, Р.Д. Романенко // Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения: материалы Всерос. конф., Барнаул, 06-11 июля. 2009г. – Барнаул : ООО «Агентство рекламных технологий», 2009. – С. 333-345.

59. Пушистов П.Ю. Результаты применения модели гидродинамики и качества воды CE-QUAL-W2 v.3.2 с автоматизированной генерацией файла батиметрии для численного воспроизведения переменных гидродинамики участка реки Северная Сосьва / П.Ю. Пушистов, В.Н. Данчев, Р.Д. Романенко // Водное хозяйство России. – 2012. – № 6. – С. 49–68.

60. Пушистов П.Ю. Синописис материалов для изучения основ разработки и эксплуатации систем поддержки принятия решений при интегрированном управлении водными ресурсами / П.Ю. Пушистов, В.А. Дикунец, В.Н. Данчев, Р.Д. Романенко // Сборник материалов XI Межд. науч.-практ. симпозиума и выставки «Чистая вода России», Екатеринбург, 18-20 мая 2011 г. – Екатеринбург, 2011. – С. 33-34.

61. Самолюбов Б.И. Система течений над сложным рельефом дна и ее влияние на перенос примесей / Б.И. Самолюбов, Т.В. Кириллова // Вестн. Моск. ун-ва. Физика. – 2010. – № 2. – С. 63–67.
62. Селегей В. Физико-географическая и геологическая характеристика Телецкого озера / В. Селегей, Б. Дехандсхюттер, Я. Клеркс, Е. Высоцкий. – Тервюрен – Бельгия, 2001. – 322 с.
63. Селегей В.В. О структуре климата долины Телецкого озера / В.В. Селегей // Метеорология и гидрология. – 1976. – № 10. – С. 44–49.
64. Селегей В.В. Телецкое озеро. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР / В.В. Селегей, Т.С. Селегей. – Л. : Гидрометеиздат, 1978. – 143 с.
65. Селегей В.В. Телецкое озеро. Очерки истории : в 3 кн. Кн. 1 / В.В. Селегей. – Новосибирск : Офсет, 2009. – 119 с.
66. Селегей В.В. Телецкое озеро. Очерки истории : в 3 кн. Кн. 2 / В.В. Селегей. – Новосибирск; Горно-Алтайск : Офсет, 2010. – 173 с.
67. Селегей В.В. Телецкое озеро: очерки истории: в 3 кн. Кн. 3 / В.В. Селегей. – Барнаул : Пять плюс, 2011. – 244 с.
68. Соловьев Д.А. Математическое и лабораторное моделирование термического бара при различных гидрометеорологических условиях : автореферат диссертации на соискание учёной степени канд. физ.-мат. наук : 25.00.28 / Д.А. Соловьев. – М., 2006. 20 с.
69. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Издание официальное. – М. : Госстрой России, 2004, – 73 с.
70. Степаненко В.М. Численное моделирование мезомасштабного взаимодействия атмосферы и гидрологически неоднородной суши / В.М. Степаненко, П.М. Миранда, В.Н. Лыкосов // Вычислительные технологии. – 2006. – Т. 11, Вып. 3. – С. 118–127.
71. Страшкраба М. Пресноводные экосистемы: математическое моделирование / М. Страшкраба, А. Гнаука ; пер. с англ. В. А. Пучкина ; под ред. В. И. Беляева. – М. : Мир, 1989. – 376 с.
72. Суперкомпьютерное моделирование в физике климатической системы : учеб. пособие / В. Н. Лыкосов [и др.]. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 2012. – 405 с.
73. Телецкое озеро /отв. ред. Е.Ю. Митрофанова, В.В. Кириллов ; Ин-т водн. и экол. проблем СО РАН. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2012. – 28 с.
74. Тихомиров А.И. О термическом баре Ладожского озера / А.И. Тихомиров // Изв. ВГО. – 1963. – Т. 95, №2. – С. 134–142.
75. Тихомиров А.И. Температурный режим и запасы тепла Ладожского озера / А.И. Тихомиров // Тр. Лабор. озероведения. – 1968. – Т.22. – С. 65–78.

76. Тихомиров А.И. Термика крупных озер / А.И.Тихомиров/ – Л. : Наука, 1982. – 232 с.
77. Филатов Н.Н. Гидродинамика озер / Н.Н. Филатов ; отв. ред. Ю.Л. Демин. – СПб. : Наука, 1991. – 197 с.
78. Хендерсон-Селлерс Б. Инженерная лимнология / Б. Хендерсон-Селлерс ; перевод под ред. К.Я. Кондратьева. – Л. : Гидрометеиздат, 1987. – 336 с.
79. Цветова Е.А. Математическое моделирование Байкальского термобара / Е.А. Цветова // Математические проблемы экологии : тез. докл. второй Всерос. конф. по мат. пробл. экологии, Новосибирск, 21-23 июня 1994 г. – Новосибирск : Институт математики им. С.Л. Соболева, 1994. – С. 44–49.
80. Цветова Е.А. Математическое моделирование циркуляций вод озера / Е.А. Цветова // Течения в Байкале. – Новосибирск : Наука, 1977. – С. 63–81.
81. Цветова Е.А. Специфические проявления конвекции в глубоких озерах / Е.А. Цветова // Математические проблемы экологии : тр. третьей Междунар. конф. – Новосибирск, 1996. – С. 181–189.
82. Цветова Е.А. Численная модель термобара в озере Байкал / Е.А. Цветова // Метеорология и гидрология. – 1997. – №9. – С. 58–68.
83. Цхай А.А. Мониторинг и управление качеством вод речного бассейна : модели и информационные системы / А.А. Цхай ; отв. ред. Д.Г.Конев. – Барнаул : Алтай, 1995. – 172 с.
84. Цыденов Б.О. Численное моделирование эффекта термобара в озере Байкал в период весенне-летнего прогревания / Б. О. Цыденов, А.В. Старченко // Вестн. Томск. гос. ун-та. Матем. и мех. – 2011. - № 1. – С. 120–129.
85. Черных Д.В. Современные ландшафты Прителецкого района (Горный Алтай) / Д.В. Черных, И.Н. Ротанова // География и природные ресурсы. – 2006. – № 1. – С. 150–154.
86. Чубаренко И.П. Горизонтальный конвективный водообмен над подводными склонами: автореферат диссертации на соискание учёной степени докт. физ.-мат. наук : 25.00.28 / И.П. Чубаренко. – М, 2010. 44 с.
87. Чубаренко И.П. Каскадинг в прибрежной зоне озера при суточных колебаниях условий теплообмена / И.П. Чубаренко, Е.Е. Есюкова // Естественные и технические науки. – 2008. – № 4. – С. 206–211.
88. Чубаренко И.П. Лабораторное моделирование структуры термобара и связанной с ним циркуляции в бассейне с наклонным дном / И.П. Чубаренко, Н.Ю. Демченко // Океанология. – 2008. – Т. 48, № 3. – С. 349–361.
89. Шимараев М.Н. К вопросу о стратификации и механизме конвекции в Байкале / М.Н. Шимараев, Н.Г. Гранин // ДАН. – 1991. – Т. 321, №2. – С. 145–160.

90. Шимараев М.Н. Элементы теплового режима озера Байкал / М.Н. Шимараев ; отв. ред. А.Н. Афанасьев. – Новосибирск : Наука, 1977. – 150 с.
91. Шлычков В.А. Численные модели для описания пространственной структуры течений в водоемах сложной морфометрии // Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения: материалы Всерос. конф., Барнаул, 06-11 июля. 2009г. – Барнаул : ООО «Агентство рекламных технологий», 2009. – С. 379–391.
92. Экологи планируют спасти Телецкое озеро от туристического прессинга (Республика Алтай) // ИА REGNUM: Информационное агентство. 28.07.2005. URL: <http://altai.regnum.ru/news/ecology/490241.html> (дата обращения: 19.03.2009).
93. A Decision Support System for the Elbe River Basin : [сайт]. URL: <http://www.elise.bafg.de> (дата обращения: 11.05.2012).
94. A Handbook for Integrated Water Resources Management in Basins – GWP, INBO. – 2009. – 104 p.
95. Aquaveo is a water resources engineering consulting firm: [сайт]. URL: <http://www.aquaveo.com> (дата обращения: 12.02.2013).
96. Berger C.J. Lake Whatcom Water Quality Model / C.J. Berger, S.A. Wells. Technical Report EWR-03-05, Maseeh College of Engineering and Computer Science, Department of Civil and Environmental Engineering, Portland State University, Portland, OR, 2005. – 839 p.
97. Carmack E.C. Combined influence of inflow and lake temperatures on spring circulation in a riverine lake / E.C. Carmack // J. Phys. Oceanogr. – 1978. – V. 9. –P. 422–434.
98. Carmack E.C. Importance of lake-river interaction on seasonal patterns in the general circulation of Kamloops Lake, British Columbia / Carmack E. C., C. B. J. Gray, C. H. Pharo, R. J. Daley // Limnol. Oceanogr. – 1979. – 24(4). – P. 634–644.
99. Carmack E.C. Mechanisms influencing the circulation and distribution of water mass in a medium residence time lake / E. C. Carmack, R. C. Wiegand, R. J. Daley, [et. al.] // Limnol. Oceanogr. – 1986. – 31(2). – P. 249–265.
100. CE-QUAL-W2 Forum : [сайт]. URL : <http://w2forum.cee.pdx.edu> (дата обращения: 15.03.2013).
101. CE-QUAL-W2 Wiki : [сайт]. URL : <http://www.cequalw2wiki.com> (дата обращения: 11.05.2010).
102. Chen C.T. Effect of salt content on the temperature of maximum density and static stability in Lake Ontario / C.T. Chen, F.J. Millero // Limnology and Oceanography. – 1977. –V. 22, № I. – P. 158–159.
103. Colorado's Decision Support System: [сайт]. URL: <http://www.cdss.state.co.us> (дата обращения: 11.05.2012).

104. Cole T.M. “CE-QUAL-W2” A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.2 / T.M. Cole, S.A. Wells. Instruction Report EL-2003-1, US Army Engineering and Research Development Center, Vicksburg, MS, 2003. – 634 p.
105. Cole T.M., Wells S.A. “CE-QUAL-W2” A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.5 / T.M. Cole, S.A. Wells. Instruction Report EL-06-1, US Army Engineering and Research Development Center, Vicksburg, MS, 2006. – 681 p.
106. Csanady G.T. Spring thermocline behavior in Lake Ontario durind IFYGL / G.T. Csanady // J. Phys. Oceanogr. – 1974. – V. 4. – P. 425–445.
107. Danchev V.N. Information system, as the tool of research of an ecosystem dynamics of a deep reservoir and its basin (on example of lake Teletskoye) / V.N. Danchev, P.Yu. Pushistov, V.V. Kirillov, A.V. Dyachenko // International conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2010, July 5-11, Tomsk, Russia: Program&Abstracts. – Tomsk. – 2010. – P 112–113.
108. Dikunets V.A. Decision support systems for water resources management of river basin. The review of methods, models and applications / V.A. Dikunets, P.Yu. Pushistov, V.N. Danchev, [et. al.] // International conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2010, July 5-11, Tomsk, Russia: Program&Abstracts. – Tomsk. – 2010. – P. 110–111.
109. Edinger J.E. Numerical Hydrodynamics of Estuaries // J.E. Edinger, E.M. Buchak ; eds. P. Hamilton and K. B. Macdonald // Estuarine and Wetland Processes with Emphasis on Modeling, Plenum Press, New York. – New York. – 1980. P. 115–146.
110. Edinger J.E. Numerical Waterbody Dynamics and Small Computers / J.E. Edinger, E.M. Buchak // Proceedings of ASCE 1985 Hydraulic Division Specialty Conference on Hydraulics and Hydrology in the Small Computer Age, Aug. 13–16, American Society of Civil Engineers, Lake Buena Vista, FL. – 1985.
111. Elliot G.H. A laboratory and mathematical study of the thermal bar: PhD thesis. Inst, of Oceanogr., Univ. of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada, 1970. 24 p.
112. ERM's Surfacewater Modeling Group : [сайт]. URL : <http://www.erm-smg.com> (дата обращения: 18.09.2012).
113. Foster T.D. An analysis of the cabbeling instability in sea water / T.D. Foster // J. Phys. Oceanogr. – 1972. – V. 2, №3. – P. 294–301.
114. GWP TAC, Background Paper No. 4. Integrated Water Resources Management. Global Water Partnership. Stockholm ; Sweden. – 2000. – 71 p.

115. Hantush M.M. TMDL model evaluation and research needs / M.M. Hantush, T. Dai, J. Koenig. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-05/149 (NTIS PB2006 101508). – 2005. – 403 p.
116. Holland P.R. Numerical modelling of the riverine thermal bar and its ecological consequences in a river-dominated lake / P.R. Holland, A. Kay, V. Botte // *Journal of Marine Systems*. – 2003. – V 43. – P. 61–81.
117. Holland P.R.. A numerical study of the dynamics of the riverine thermal bar in a deep lake / P.R. Holland, A. Kay, V. Botte // *Environmental Fluid Mechanics*. – 2001. – V. 1. – P. 311–332.
118. Hutchinson G. E. A treatise on limnology : geography, physics and chemistry / G. E. Hutchinson. John Wiley and Sons, Inc. – New York. – 1957. – 1015 pp.
119. IWRM ToolBox Version 2 – Foreword – GWP. – 2008. – 154 p.
120. Ladoga and Onego - Great European Lakes: Observations and Modeling / eds. Rukhovets L., Filatov N. – London : Springer-Praxis. – 2010. – 308 p.
121. Lake Whatcom Models Review. Independent review performed by Tetra Tech for the Washington State Department of Ecology, April 2008 Publication no. 09-10-013. – 38 p.
122. Loginetics, Inc. : [сайт]. URL : <http://www.loginetics.com> (дата обращения: 13.03.2013).
123. Loucks D.P. Water resources systems planning and management: an introduction to methods, models and applications / D.P. Loucks, E. Beek with contributions from Jerry R. Stedinger, Jozef P.M. Dijkman, Monique T. Villars. Paris: UNESCO Publishing – ISBN 92-3-103998-9. – 2005. – 680 p
124. Malm J. Spring circulation associated with the thermal bar in large temperate lakes / J. Malm // *Nordic Hydrology*. – 1995. – № 26. – P. 331-338.
125. Miller J.B. East Canyon Reservoir CE-QUAL-W2 Model / Miller J.B. Water Quality Assessment Utah DEQ Phosphorus TMDL. JM Water Quality, LLC, Hooper. – 2008. – 100 p.
126. Modelling Aspects of Water Framework Directive Implementation / P.A. Vanrolleghem. London ; New-York: IWA Publishing - ISBN 9781843392231. – 2010. – V. 1. – 352 p.
127. NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC) : [сайт]. URL : <http://www.ngdc.noaa.gov> (дата обращения: 11.05.2010).
128. Romanenko R.D. Results of the analysis of sensitivity predictive variables of dynamics ecosystems deep reservoir and rivers to variability of parameters geophysical forcing on the basis of application of model CE-QUAL-W2 / R.D. Romanenko, V.N. Danchev, Yu.V. Sokolovich, F.N. Kolesnikov // *International Conference on Computational Information Technologies for*



Environmental Sciences, CITES-2009, July 11-15, Krasnoyarsk, Russia: Program&Abstracts – Krasnoyarsk. – 2009. – P. 40–41

129. Ryle R. Ice Formation on Brownlee Reservoir and Potential Effects on Big Game Populations / R. Ryle, N. Mesner, S. Jensen. In: Technical appendices for new license application: Hells Canyon Hydroelectric Project. Idaho Power, Boise, ID. Technical Report E.3.2-35. – 2001. – 78 p.

130. Sene K. Flood warning, forecasting and emergency response / K. Sene. – New York: Springer, 2008. – 303 p.

131. Strøm K.M. The temperature of maximum density in fresh waters / K.M. Strøm // *Geofys. Publ.* – 1945. – № 16. – 14 p.

132. The CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) : [сайт]. URL : <http://srtm.csi.cgiar.org> (дата обращения: 11.05.2010).

133. Tsvetova E.A. Convective currents associated with the thermal bar of Lake Baikal / E.A. Tsvetova // *Advanced Mathematics: Computations and Applications*. NCC Publisher. – 1995. – P. 386–393.

134. U.S. Army Corps of Engineers : [сайт]. URL : <http://www.erdc.usace.army.mil> (дата обращения: 22.12.2012).

135. Vasiliev O.F. Mathematical modeling of thermal bar in Lake Teletskoye / O.F. Vasiliev, V.I. Kvon, D.V. Kvon // *Proceedings of the 28 IAHR Congress, Theme D, Graz, Austria*. – 1999. – 6 p.

136. Vasiliev O.F. Numerical Modelling of Thermal Bars in Deep Lakes / O.F. Vasiliev, O.B. Bocharov, V.I. Kvon, [et. al.] // In: *Proceedings, the 3-rd International Conference on Hydro-Science and Engineering, Cottbus/Berlin, Germany*. – 1998. – 20 p. CD-ROM

137. Walker S.J. A three-dimensional numerical model of deep ventilation in temperate lakes / S.J. Walker, R.G. Watts // *J. Geophys. Res.* – 1995. – V. 100. – P. 22711–22731.

138. Water Framework Directive: Model Supported Implementation. A water manager's guide / F.F. Hattermann, Z.W. Kundzewicz. London ; New-York: IWA Publishing - ISBN 9781843392736. – 2010. – 268 p.

139. Water quality research group Portland State University – CE-QUAL-W2 : [сайт]. URL : <http://www.ce.pdx.edu/w2> (дата обращения: 11.03.2013).

140. Wells S.A. Surface Water Hydrodynamic and Water Quality Models: Use and Misuse / S.A. Wells // *23rd Annual Water Law Conference San Diego, CA February, 24-25*. – 2005. – 10 p.

141. Wiegand R.C. Some types of temperature inversion encountered in a freshwater lake with short residence time / R.C. Wiegand, C. Ronald, E. C. Carmack // *Limnol. Oceanogr.* – 1981. – V. 26(3). – P. 565–571.

142. Wu W. Computational River Dynamics / W. Wu. London ; Leiden ; New York ; Singapore. – 2007. – 509 p.

143. Zilitinkevich S.S. The thermal bar / S.S. Zilitinkevich, K.D. Kreiman, A.Y. Terzhevik // J. Fluid Mech. – 1992. – № 236. – P. 22-47.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблицы некоторых количественных оценок прогностических возможностей ИВК «Телецкое озеро» за период с 1 апреля по 1 августа 1968 г.

Таблица А.1 – Абсолютные ошибки прогноза ( $AE_B$ ) температуры воды в придонном слое Телецкого озера за апрель – июль 1968 г.

Пункт набл.	Кыгинский залив, вертикаль 28, сегмент 203									
Дата	18.04	27.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
$AE_B, ^\circ C$	0.00	0.00	0.16	0.19	0.26	0.08	0.08	0.08	0.01	0.08
Пункт набл.	Мыс Кырсай, вертикаль 19, сегмент 103									
Дата	18.04	27.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
$AE_B, ^\circ C$	0.09	0.11	0.26	0.53	0.07	0.09	0.08	0.14	0.18	0.14
Пункт набл.	р. Челюш, вертикаль 27, сегмент 120									
Дата	18.04	27.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
$AE_B, ^\circ C$	0.05	0.03	0.18	0.19	0.31	0.17	0.10	0.20	0.46	0.22
Пункт набл.	р. Кокши, вертикаль 13, сегмент 130									
Дата	18.04	27.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
$AE_B, ^\circ C$	0.10	0.37	0.01	0.31	0.38	0.22	0.24	0.30	0.27	0.34
Пункт набл.	р. Б. Корбу, вертикаль 26, сегмент 145									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
$AE_B, ^\circ C$	0.06	0.11	0.09	0.00	0.33	0.31	0.23	0.38	0.32	0.17
Пункт набл.	Камгинский залив, вертикаль 25, сегмент 335									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	19.06	30.06	9.07	20.07
$AE_B, ^\circ C$	–	–	0.57	0.37	–	0.08	0.08	0.08	0.08	0.46
Пункт набл.	п. Яйлю, вертикаль 6, сегмент 224									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	20.06	30.06	9.07	20.07
$AE_B, ^\circ C$	0.00	0.14	0.07	0.14	0.08	0.10	0.08	0.30	0.34	0.12

## Продолжение таблицы А.1

Пункт набл.	мыс Ажи, вертикаль 24, сегмент 237									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	19.06	30.06	9.07	20.07
АЕв, °С	–	–	0.37	0.09	0.01	0.03	0.15	0.26	0.23	0.19
Пункт набл.	мыс Караташ, вертикаль 23, сегмент 272									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	19.06	30.06	9.07	20.07
АЕв, °С	–	–	0.08	0.01	0.40	0.01	0.00	0.16	0.17	0.78
Пункт набл.	с. Артыбаш, вертикаль 22, сегмент 318									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	19.06	30.06	9.07	20.07
АЕв, °С	–	–	0.6	0.1	0.47	0.08	0.15	0.2	<b><u>1.42</u></b>	0.01

Таблица А.2 – Абсолютные ошибки прогноза (АЕ<sub>м</sub>) температуры воды на средних горизонтах измерений рейдовых вертикалей Телецкого озера за апрель–июль 1968 г.

Пункт наблюдений	Кыгинский залив, вертикаль 28, сегмент 203, Н <sub>ср</sub> = 50 м									
Дата	18.04	27.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
АЕ <sub>м</sub> , °С	0.10	0.20	0.40	0.50	0.20	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
Пункт набл.	Мыс Кырсай, вертикаль 19, сегмент 103, Н <sub>ср</sub> = 140 м									
Дата	18.04	27.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
АЕ <sub>м</sub> , °С	0.04	0.20	0.20	0.10	0.88	0.55	0.08	0.02	0.06	0.02
Пункт набл.	р. Челюш, вертикаль 27, сегмент 120, Н <sub>ср</sub> = 140 м									
Дата	18.04	27.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
АЕ <sub>м</sub> , °С	0.11	0.08	0.00	0.00	0.08	0.03	0.09	0.17	0.12	0.01
Пункт набл.	р. Кокши, вертикаль 13, сегмент 130, Н <sub>ср</sub> = 140 м									
Дата	18.04	27.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
АЕ <sub>м</sub> , °С	0.06	0.14	0.08	0.11	0.16	0.22	0.05	0.06	0.12	0.02

## Продолжение таблицы А.2

Пункт набл.	р. Б. Корбу, вертикаль 26, сегмент 145, $H_{cp} = 160$ м									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	5.06	11.06	20.06	29.06	9.07	20.07
$AE_m, ^\circ C$	0.10	0.04	0.05	0.03	0.08	0.15	0.22	0.23	0.27	0.14
Пункт набл.	Камгинский залив, вертикаль 25, сегмент 335, $H_{cp} = 20$ м									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	19.06	30.06	9.07	20.07
$AE_m, ^\circ C$	–	–	0.20	0.28	–	0.08	0.02	0.03	0.02	0.20
Пункт набл.	п. Яйлю, вертикаль 6, сегмент 224, $H_{cp} = 120$ м									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	20.06	30.06	9.07	20.07
$AE_m, ^\circ C$	0.05	0.17	0.18	0.10	0.05	0.09	0.03	0.12	0.19	0.19
Пункт набл.	мыс Ажи, вертикаль 24, сегмент 237, $H_{cp} = 115$ м									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	19.06	30.06	9.07	20.07
$AE_m, ^\circ C$	–	–	0.05	0.12	0.05	0.00	0.06	0.013	0.05	0.09
Пункт набл.	мыс Караташ, вертикаль 23, сегмент 272, $H_{cp} = 7$ м									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	19.06	30.06	9.07	20.07
$AE_m, ^\circ C$	–	–	0.14	0.09	0.38	0.01	0.11	0.14	0.45	0.80
Пункт набл.	с. Артыбаш, вертикаль 22, сегмент 318, $H_{cp} = 5$ м									
Дата	18.04	28.04	11.05	21.05	6.06	11.06	19.06	30.06	9.07	20.07
$AE_m, ^\circ C$	–	–	0.38	0.10	0.36	0.09	0.32	0.60	0.1	0.08