

556.013:556.536.2:556.555

©В.Н. Данчев, П.Ю. Пушистов

**ОПЫТ РАЗРАБОТКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ
ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ И КАЧЕСТВА ВОДЫ РЕК
И ВОДОЕМОВ БАСЕЙНА ОБИ. ЧАСТЬ 2 - ТЕЛЕЦКОЕ ОЗЕРО
И УЧАСТОК РЕКИ ЧУЛЫШМАН**

Описаны цели разработки, структура и технология применения информационно-вычислительного комплекса для моделирования динамики экосистемы Телецкого озера. Обсуждаются проблемы калибровки и верификации комплекса, представлены результаты численных экспериментов по моделированию циркуляций и термического режима южной части Телецкого озера в весенний период.

Ключевые слова: Телецкое озеро, водная экосистема, модель гидродинамики и качества воды, база данных, речной термический бар.

V.N. Danchev, P.Yu. Pushistov

**EXPERIENCE AND RESULTS OF THE DEVELOPMENT OF INFORMATION
AND COMPUTATIONAL COMPLEX FOR SIMULATION OF HYDRODYNAMICS
AND WATER QUALITY OF RIVERS AND LAKES OB BASIN.
PART 2 - LAKE TELETSKOYE AND SECTION OF THE RIVER CHULYSHMAN**

Objectives of the development, structure and technology of information and computer system for modeling the dynamics of the ecosystem of Lake Teletskoye are described. The problems of calibration and verification of the complex, the results of numerical experiments on modeling of circulation and thermal regime of the southern part of Lake Teletskoye in the spring are discussed.

Keywords: Teletskoye Lake, aquatic ecosystem, the model of hydrodynamics and water quality, data base, riverine thermal bar.

Введение

Водными объектами, для которых разработан, описываемый в данной статье информационно-вычислительный комплекс (ИВК) моделирования гидродинамики и качества воды, являются Телецкое озеро и устьевой участок реки Чулышман. Телецкое озеро – крупнейший водоем бассейна реки Оби [1-3]. Озеро состоит из двух частей: северной субширотной, длиною около 37 км (включая Камгинский залив) и субмеридиональной, вытянутой на 48 км. Средняя и максимальная ширина озера равна 2,9 и 5,2 км, соответственно, площадь зеркала — 227,3 км². Благодаря большой глубине (средняя глубина озера - 181 м, максимальная - 323 м) в нём содержится более 40 км³ пресной воды высокого качества, 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. Вытекает из Телецкого озера река Бия, которая, сливаясь с Катунью, образует реку Обь. Телецкое озеро в 1998 г. внесено ЮНЕСКО в реестр объектов Всемирного природного наследия [3].

История исследования Телецкого озера берет свое начало в XVIII веке и подробно описана в [1-4]. Значительной вехой в экспериментальном изучении озера является 1965 год, когда на базе метеорологической станции поселка Яйлю была открыта Озерная станция Западно-Сибирского УГМС. По результатам комплексных наблюдений Озерной станции за период с 1965 по 1980 гг. авторам [1] удалось создать основу феноменологической модели гидрометеорологического режима Телецкого озера, которая активно используется до настоящего времени, в том числе, при построении и верификации двумерных моделей циркуляции и термического режима озера [5, 6 и др.].

В Институте водных и экологических проблем СО РАН, начиная с 1989 г., реализуется комплексная программа, включающая гидрофизические, гидрохимические, гидробиологические и палеолимнологические исследования. 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 [4].

Что касается антропогенных нагрузок на экосистему и водосборный бассейн озера, то в [7] на основе анализа использования природных систем выделено 5 классов геосистем по преобладающему типу антропогенного воздействия: селитебные, горнопромышленные, лесохозяйственные, сельскохозяйственные, рекреационные. Научно обоснованная система оперативного контроля и управления антропогенной нагрузкой на акваторию и бассейн Телецкого озера отсутствует [3].

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 решения при интегрированном управлении бассейном озера [8]. Пример успешного и инновационного, по своей сути, проекта обоснования норм антропогенных нагрузок (TMDL – суммарная максимальная суточная нагрузка) на экосистему глубокого горного озера Ватком приведен в [9,10]. Инструментом анализа TMDL озера Ватком является единая информационно-моделирующая система (ИМС), включающая в себя модель гидродинамики и качества воды CE-QUAL-W2 (далее W2) [9], для описания динамики экосистемы озера и модель экосистемы бассейна озера - HSFP (фортран-программа гидрологического моделирования) [10].

Близкий по замыслу проект, дополнительно предполагающий включение в состав ИМС численных моделей динамики погодно-климатического форсинга на площади водосбора Телецкого озера, представлен в [11]. Цель настоящей статьи – ознакомить читателя с первыми результатами разработки ИБК для описания динамики экосистемы Телецкого озера с прямым учетом гидродинамики и качества воды устьевоего участка реки Чулышман (далее, ИБК «Телецкое озеро»).

1. Состав информационно-вычислительного комплекса «Телецкое озеро»

Информационно-вычислительный комплекс, разработанный для моделирования динамики экосистемы Телецкого озера и гидродинамики и качества воды устьевоего участка реки Чулышман, включает в себя три модуля: 1 – система моделирования бассейна – WMS; 2 - версия 3.5 модели W2 (далее - W2 v.3.5); 3 – БД для обеспечения работы модулей 1 и 2.

Система базовых уравнений модели W2 v.3.5 имеет следующий вид [12]:

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

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

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

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

$$B_{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h UB ds - \int_{\eta}^h qB ds, \quad (5)$$

где t – время; U и W – компоненты скорости вдоль осей x и z , соответственно; B – ширина русла реки или котловины озера; g – ускорение силы тяжести; P – давление; τ_x – поперечно осредненное касательное напряжение вдоль оси x ; τ_z – поперечно осредненное касательное напряжение вдоль оси z ; ρ – плотность; η – уровень поверхности воды; q – распределение по x и z результирующих расходов воды боковых притоков; $f(T_w, \Phi_{TDS}, \Phi_{ISS})$ – функция зависимости плотности от температуры воды (T_w), солёности или суммарной концентрации растворенных в воде веществ (Φ_{TDS}), и концентрации неорганических взвешенных веществ (Φ_{ISS}); α – угол уклона русла реки (для котловины озера $\alpha=0$).

Уравнение для описания динамики полей температуры и показателей качества воды модели W2 v.3.5 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 Φ – поперечно осредненные значения T_w или концентраций показателей качества воды; D_x и D_z – коэффициенты продольной и вертикальной дисперсии для Φ ; q_Φ – расходы боковых притоков или оттоков Φ ; S_Φ – слагаемое поперечного осредненного источника / стока Φ .

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



Рис. 1. Схема задания уклона русла реки.

Описание метода декомпозиции русла на отдельные участки для определения соответствующих значений α дано в разделе «Река», главы 3 [12]. При применении (1) –(6) для описания физических, химических и биологических процессов Телецкого озера использовалась декартова система координат, т.е. полагалось, что $\alpha = 0$.

Блоки гидродинамики версий 3.5 и 3.2 модели W2 практически совпадают. Гидродинамический блок версии 3.2 описан в первой части публикации, посвященной представлению ИВК «Северная Сосьва». В блоке расчета показателей качества воды модели W2 v.3.5, по сравнению с v.3.2 увеличено общее количество основных и производных переменных. В частности, группы фитопланктона и перифитона, описываемые версией 3.2, дополнены группами макрофитов и зоопланктона [12].

Начальные и граничные условия для системы уравнений (1) - (6) задаются, согласно [12], на основе данных наблюдений, содержащихся в БД ИВК, либо иным способом – в зависимости от целей конкретных численных экспериментов с моделью W2.

Система моделирования бассейна WMS [13], подробно описанная в первой части публикации, является в составе ИВК «Телецкое озеро» инструментом препроцессинговой обработки входных данных для подготовки модели топографии береговой зоны озера и поймы участка реки Чулышман, а также модели и файла батиметрии для W2 v.3.5.

Область моделирования ИВК «Телецкое озеро» включает в себя: 1 – участок реки Чулышман от г/п Балыкча до устья реки (длина участка - 9,8 км), 2 – меридиональную и широтную части Телецкого озера, включая Камгинский залив, 3 – исток реки Бин, 4 – устьевые зоны наиболее крупных боковых притоков к озеру, а также, береговые или буферные зоны Телецкого озера и участка реки Чулышман.

В соответствии с файловой структурой организации входной информации модели W2 база данных ИВК «Телецкое озеро» имеет следующие модули: 1 – батиметрия озера и участка реки Чулышман, топография береговой зоны; 2 – метеорология; 3 – гидрология; 4 – характеристики качества воды.

2. Технология и результаты автоматизированной генерации файла батиметрии модели W2

Файл батиметрии модели W2 в ИВК «Телецкое озеро» генерируется с помощью системы WMS. Ключевой момент при генерации файла батиметрии Телецкого озера и участка реки Чулышман 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 модуля 1 БД ИВК:

- 1 - цифровая батиметрическая карта Телецкого озера при отметке уреза воды 434 мБС [2];
- 2 - цифровые модели рельефа, полученные из цифровой базы данных Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) США, размещенные в открытом доступе в Национальном геофизическом информационном центре (NGDC) [14];
- 3 - цифровая модель рельефа SRTM (Shuttle Radar Topography Mission – радарная топографическая миссия Шаттл) [15].

Данные об отметках высот и глубинах, содержащиеся в перечисленных выше источниках, с помощью ArcGIS 9.3 были конвертированы в единую TIN. После создания TIN производится последовательная декомпозиция моделируемого водного объекта на: 1 - крупные водные тела (WB) с характерными особенностями батиметрии, параметров экосистемы и с индивидуальным описанием метеорологического форсинга; 2 - отдельные участки или водотоки (Bг) в составе WB; 3 - сегменты, на которые делятся Bг; 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 [1] о целесообразности разбиения акватории Телецкого озера с учетом разнообразия глубин и термического режима на пять участков (см. раздел 5.3 главы 5 [1]). Далее на основании данных высотных отметок поверхностей и глубин, содержащихся в TIN, и декомпозиции водного объекта (водные тела → водотоки → сегменты → слои) с помощью WMS генерируется файл батиметрии модели W2.

На рис. 2 показан пример расчетной сетки модели W2, сгенерированной с помощью ИВК «Телецкое озеро» и состоящей из 4 водных тел (WB1 – устьевой участок реки Чулышман, WB2 – южная оконечность озера, включая Кыгинский залив, WB3 – меридиональная часть озера, WB4 – зональная часть озера, включая Камгинский залив), 7 водотоков (Bг 1-3 в составе WB1, Bг4 в составе WB2, Bг5 в составе WB3 и Bг6-7 в составе WB4) при общем числе сегментов, равном 308. Толщины слоев воды речного участка заданы равными 0,5 м и самого озера - равными 1 м в слое от поверхности до глубины 135 м и 3 м ниже этой глубины до дна водоема. Длины сегментов в зависимости от распределения уклонов котловины озера по тальвегу изменялись от 20 до 2087 м.

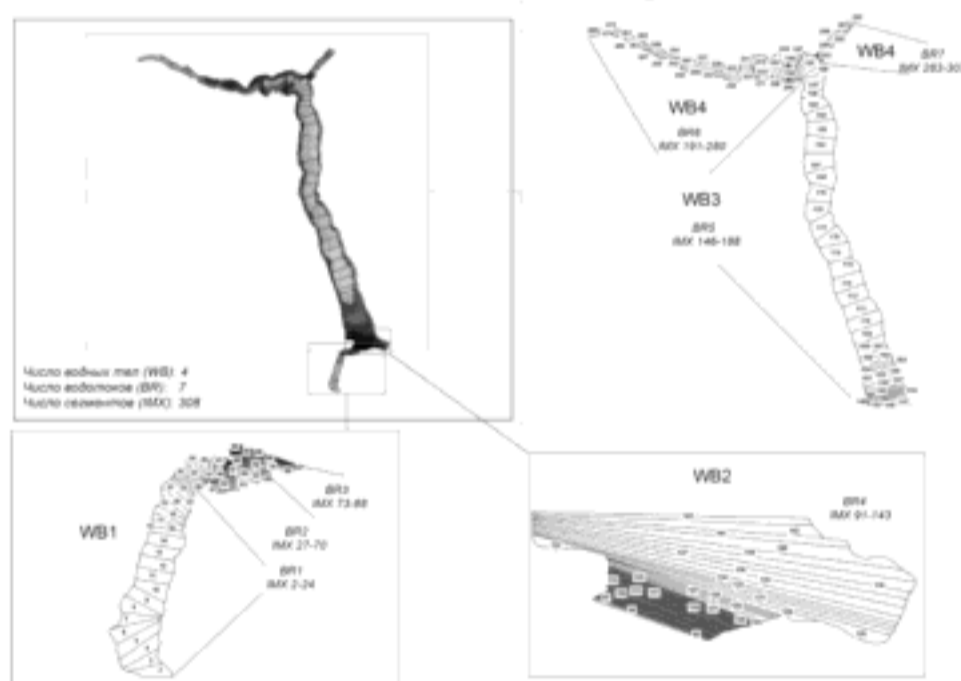


Рис. 2. Расчетная сетка устьевом участка реки Чулышман и Телецкого озера в плане.

3. Проблемы калибровки и верификации ИВК «Телецкое озеро». Результаты воспроизведения стадий формирования речного термического бара

В данном разделе мы кратко обсудим основные проблемы, которые необходимо преодолеть при калибровке и верификации блока гидродинамики и термического режима модели W2 v.3.5 и конкретные результаты численного воспроизведения четырех фаз весенней циркуляции, индуцируемой речным притоком в приустьевой части глубокого озера [16]. В числе упомянутых проблем остановимся на двух. Первая – это оценка адекватности и достаточности данных наблюдений, используемых при калибровке для задания начальных и граничных условий. Наиболее обременяющим для калибровки водного баланса Телецкого озера является дефицит данных гидрологических наблюдений в устьевых зонах боковых притоков к озеру (см. табл. 5 [1]). В БД ИВК «Телецкое озеро» включены имеющиеся данные наблюдений с гидропостов, расположенных на реках Чири, Кокши и Чеченег. В сумме, это около 5 % боковой приточности, оцениваемой по площади водосбора указанных притоков. Однако данные о расходах и температуре воды на реках Кыга, Боль-

шие и Малые Чили, Камга, Колдор, Самыш и др. (в сумме они составляют около 24 % боковой приточности) отсутствуют. Различные способы решения данной проблемы предлагаются в [1, 12].

По рекомендации В.В. Селегея в качестве основного года для проведения калибровки гидродинамики и термического режима озера был выбран 1968 год. Именно этот год характеризуется наиболее полным набором доступных данных гидрометеорологических наблюдений Озерной станции Западно-Сибирского УГМС, которые детально проанализированы в [1-3] и частично использовались для верификации моделей [5, 6 и др.]. Дополнительно в модули 2 и 3 БД ИВК «Телецкое озеро» были включены осредненные (среднесуточные, пентадные и декадные) гидрометеорологические данные с метеостанций и постов Озерной станции за период 1968-1972 гг., которые будут использованы для оценок внутрисезонной и межгодовой изменчивости термического режима Телецкого озера при различных сценариях боковой приточности и погодно-климатического форсинга.

Вторую проблему калибровки и верификации модели W2 для воспроизведения гидродинамики и термического режима Телецкого озера точно определяет позиция авторов [12, глава 3, стр. 20]: «Глубокое понимание процессов, которые предстоит моделировать, так же, 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. Основа феноменологической модели внутригодовой эволюции термического режима озера разработана В.В. Селегеем [1-3]. В ней автор выделил 4 периода (лимносезона): 1 – период весеннего нагревания, с формированием термических баров на мелководном северо-западном участке и юге меридиональной части озера; 2 – период летнего нагревания, с различными типами вертикальной стратификации и влияния ветрового форсинга; 3 – период осеннего охлаждения с двумя последовательными фазами: в условиях прямой стратификации до момента возникновения термических баров (с реализацией механизмов перемешивания водных масс всей толщи озера при штормах) и при наличии термических баров; 4 - период зимнего минимума.

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 Кармака и соавторов [16-18]. Озера Камлупс и Коотеней по многим физико-географическим и термодинамическим характеристикам можно считать аналогами Телецкого озера.

Феноменологические модели Селегея [1] и Кармака [16-18] во многом идентичны относительно обобщенных характеристик термического режима и доминантных механизмов и типов циркуляции озер 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 [17] делится на три фазы: А – «ранняя весна», когда прогреваемые до 4 °С (температура максимальной плотности) речные воды основного притока опускаются ко дну озера вдоль склона котловины водоема, примыкающего к устью реки, образуя плотностную склоновую струю; В – «середина весны», когда дальнейшее нагревание речных вод выше 4 °С приводит к формированию речного термического бара [16] вблизи границы «озеро-река» с продолжающимся опусканием «тяжелой» смеси речной и озерной воды ко дну водоема вдоль приустьевых склона; С – «поздняя весна», когда температура верхних слоев озера достигает значений равных или выше 4 °С, каббеллинг-процесс [16], поддерживающий речной термический бар, прекращается, а теплая речная вода вблизи устья реки деблокируется и начинает распространяться в поверхностных слоях озера, приводя к формированию первичного термоклина.

Причина отсутствия описания фаз А и В периода весеннего нагревания в феноменологической модели Селегея на участке озера, непосредственно примыкающего к устью реки Чулышман, как нам представляется, достаточно проста. Основные термодинамические события фаз А (плотностная склоновая струя) и В (речной термический бар, запирающий приток речной воды в озеро) «разыгрываются», согласно феноменологической модели Кармака, над крутым склоном котловины, примыкающим к дельте реки Томпсон на участке длиной менее 1 км (см. рис. 6 из статьи [16]). То же самое должно быть справедливо для южной оконечности Телецкого озера. Однако ближайший

озерный гидрологический разрез, на котором фиксируются вертикальные профили T_w (м. Кырсай) располагается на расстоянии около 2 км от устья Чулышмана. Таким образом, отсутствие фаз А и В, в модели Селегея, связано с отсутствием пунктов наблюдений «в нужном месте и в нужное время».

Для того чтобы проверить высказанные нами предположения, было принято решение сделать попытку воспроизвести с помощью ИВК «Телецкое озеро» схему смены 4 типов циркуляции, обусловленных проникновением в озеро быстро прогреваемых в весенний период речных вод (схему Кармака [16]), когда температура воды озера гипотетически считается величиной постоянной и равной 2 °С, а поступающая речная вода быстро прогревается от 0 до 8 °С. В схеме Кармака [16] также были проигнорированы эффекты поверхностного теплообмена, усложняющие термическую структуру открытого озера.

Всего были проведены 4 численных эксперимента (а, b, с и d), соответствующие 4 типам циркуляции схемы Кармака, которые показаны на рис. 3 [16]. По полной аналогии со схемой Кармака, в модели W2 значения температуры воды речного притока - T_R (в нашем случае T_w на г/п Балыкча) задавались равными 0, 4, 6 и 8 °С, для воспроизведения 4 типов циркуляции схемы Кармака, соответственно. Расходы воды на входном створе (Q_R) задавались с помощью БД ИВК, как средние значения на г/п Балыкча за период 1968-72 гг. Значения Q_R были заданы равными: 20 м³/с для циркуляции типа а (30 марта среднего года); 60 м³/с для циркуляции типа b (20 апреля); 590 м³/с для циркуляции типа с (16 мая); и 950 м³/с для циркуляции типа d (26 мая). Блок теплообмена на поверхности воды в модели W2, как и в схеме Кармака, был отключен. Остальные параметры модели W2 были заимствованы из работы [9].

Результаты расчетов численных экспериментов а, b, с и d, показаны на рис. 3 в виде полей T_w и векторного представления течений. Последовательное сопоставление фрагментов а, b, с и d рис. 3 настоящей статьи и соответствующих фрагментов рис. 3 из работы [16] позволяет сделать однозначный вывод о полном феноменологическом подобии типов циркуляции в схеме Кармака и воспроизводимых с помощью ИВК «Телецкое озеро».

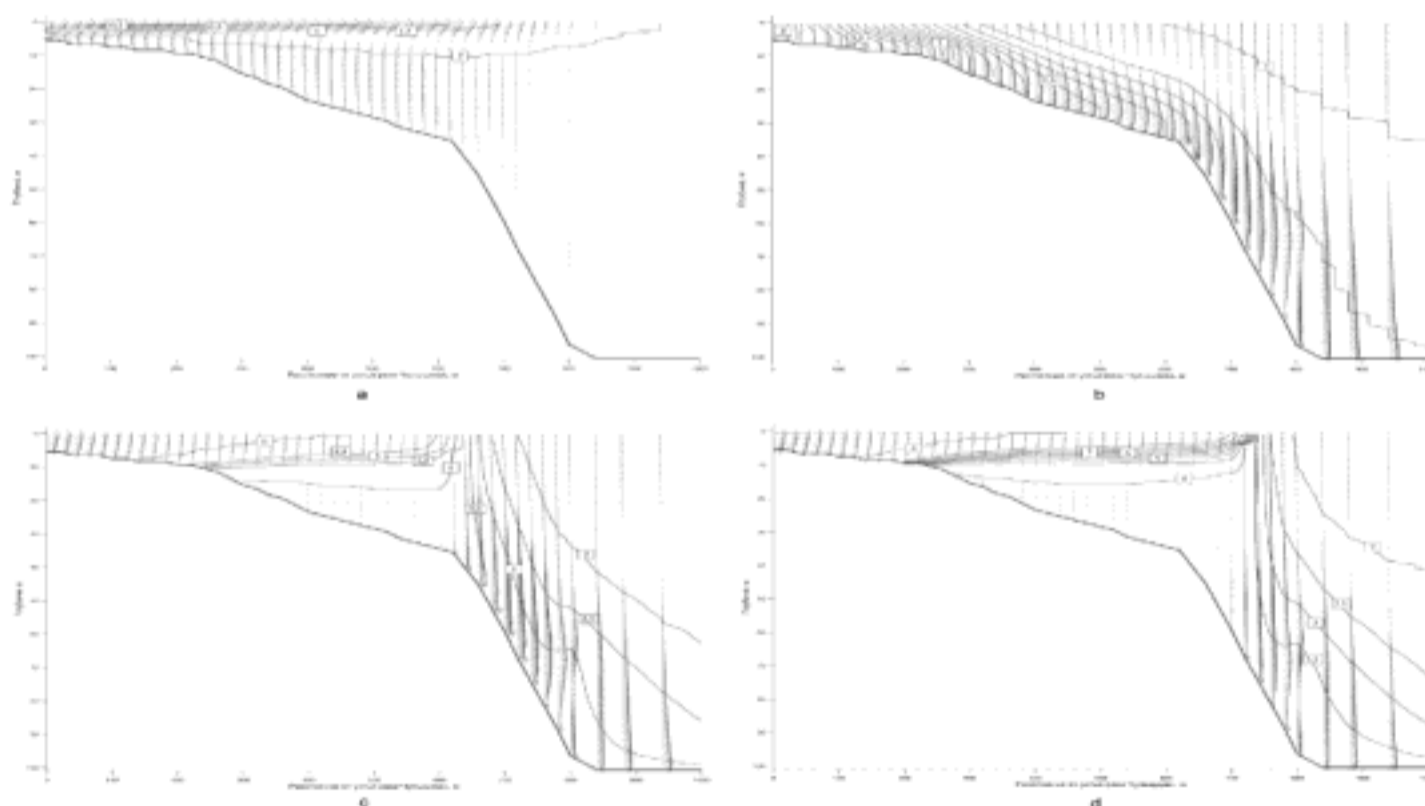


Рис. 4. Поля температуры воды и векторные отображения течений, полученные с помощью ИВК «Телецкое озеро» для сравнения с типами циркуляции схемы Кармака [16]

Заключение

1. Наличие в научной литературе вполне адекватных феноменологических моделей циркуляции и термического режима глубоких горных озер и разработка информационно-вычислительного комплекса, включающего в себя программные средства WMS, CE-QUAL-W2 v.3.5 и соответствующую БД, позволили получить многоцелевой компьютерный инструмент, предназначенный для решения комплексных научных и практических задач, связанных с динамикой экосистемы Телец-

кого озера, о чем свидетельствует анализ серий численных экспериментов, проведенных авторами статьи, с блоком гидродинамики и теплопереноса модели W2.

2. 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 речного и озера термических баров.

Благодарности

Авторы выражают признательность чл.-кор. РАН В.Н. Лыкосову, д-ру геогр. наук В.А. Земцову, д-ру физ.-мат. наук В.Н. Крупчатникову и канд. биол. наук В.В. Кириллову за поддержку данной работы, ценные советы и рекомендации. Особой благодарности заслуживает известный исследователь Телецкого озера В.В. Селегей, многочисленные обсуждения и дискуссии с которым позволили нам лучше понять, что и как надо делать.

Литература

1. Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеоиздат, 1978. - 143 с.
2. Селегей В., Дехандсхюттер Б., Клерке Я., Высоцкий Е. Физико-географическая и геологическая характеристика Телецкого озера. Тервюрен – Бельгия, 2001. – 322 с.
3. Селегей В.В. Телецкое озеро: очерки истории: в 3 кн. Барнаул: Пять плюс, 2011. – Кн. 3. – 244 с.
4. Васильев О.Ф., В.В. Селегей, В.В. Кириллов. Озеро Телецкое – особенности лимнологической системы: история и перспективы исследования // Байкал – природная лаборатория для исследования изменения окружающей Среды и климата. Иркутск: Лисна, 1994. Т. 6. 50 с.
5. Vasiliev O.F., Kvon V.I., Kvon D.V. Mathematical modeling of thermal bar in Lake Teletskoye. Proceedings of the 28 IAHN Congress, Theme D, Graz (Austria), 1999.6 p.
6. Квон Д.В., Квон В.И., Семчуков А.Н. Численный расчет продольно-вертикальной термической структуры Телецкого озера в годовом цикле // Вычислительные технологии. 2000. Т. 5, № 3. С. 29-45.
7. Черных Д.В., Ротанова И.Н. Современные ландшафты Прителецкого района (Горный Алтай) // География и природные ресурсы. 2006. № 1. С. 150-154.
8. Daniel P. Loucks and Eelco van Beek with contributions from Jerry R. Stedinger, Jozef P.M. Dijkman, Monique T. Villars. Water Resources Systems Planning and Management An Introduction to Methods, Models and Applications. Studies and Reports in Hydrology. UNESCO PUBLISHING. – 2005. – 676 p.
9. Berger C.J. and Wells S.A. Lake Whatcom Water Quality Model. 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.
10. 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.
11. Danchev V. N., Pushistov P. Yu., Kirillov V. V., Dyachenko A. V. Information system, as the tool of research of an ecosystem dynamics of a deep reservoir and its basin (on example of lake Teletskoye) / International conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2010, July 5-11, Tomsk, Russia: Program&Abstracts, P 112-113
12. Cole T. M. and Wells S. A. "CE-QUAL-W2" A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.5, Instruction Report EL-06-1, US Army Engineering and Research Development Center, Vicksburg, MS, 2006. – 681 p.
13. URL: <http://www.aquaveo.com>
14. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/>
15. URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/>
16. Carmack, E. C. Combined influence of inflow and lake temperatures on spring circulation in a riverine lake, J. Phys. Oceanogr. 9, 1978. P. 422–434.
17. Carmack, E. C., Gray, C. B. J., Pharo, C. H. & Daley, R. J. Importance of lake-river interaction on seasonal patterns in the general circulation of Kamloops Lake, British Columbia. Limnol. Oceanogr. 24(4), 1979. P. 634–644.
18. Carmack, E. C., Wiegand, R. C., Daley, R. J., Gray, C. B. J., Jasper, S. & Pharo, C. H. Mechanisms influencing the circulation and distribution of water mass in a medium residence time lake. Limnol. Oceanogr. 31(2), 1986. P. 249–265.

Пушистов Петр Юрьевич, д-р физ.-мат. наук, проф., научный консультант, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; e-mail: pushtcmpr@mail.ru

Данчев Василий Николаевич, аспирант, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; e-mail: danchev_vasilii@mail.ru

Pushistov Peter Yurievich, doctor of physical and mathematical sciences, professor, scientific adviser, Institute for Water and Environmental Problems Siberian Branch of the RAS, Russia, 656038, Barnaul, ul. Molodyoznaya, 1.

Danchev Vasily Nikolayevich, postgraduate, Institute for Water and Environmental Problems Siberian Branch of the RAS, Russia, 656038, Barnaul, ul. Molodyoznaya, 1.