

УДК 556.555.4

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВОД РЕКИ ЧУЛЫШМАН НА ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ТЕЛЕЦКОГО ОЗЕРА В ЛЕТНИЕ МЕСЯЦЫ¹

© 2025 г. А. Т. Зиновьев*, К. Б. Кошелев, А. В. Дьяченко

Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, Барнаул, 656038 Россия

**e-mail: lgg-iwep@yandex.ru*

Поступила в редакцию 28.08.2024 г.

После доработки 07.10.2024 г.

Принята к публикации 28.10.2024 г.

Рассмотрено влияние р. Чулышман на формирование картины плотностной стратификации Телецкого озера в летние месяцы. Актуальность данной проблемы определяется важностью исследования специфических особенностей процессов переноса примесей и загрязнений в условиях формирования термоклина и термобара и обновления вод в озере. При решении вышеупомянутых задач используются методы математического моделирования и данные натурных наблюдений. Для рассмотрения термогидродинамических процессов в глубоком Телецком озере и р. Чулышман на основе открытого пакета Delft3D построены компьютерные модели: для озера — усовершенствованная 3D-модель; течение р. Чулышман в его устьевой области описывается на основе плановой (2DH) модели. Выполнено сопряжение 3D- и 2DH-моделей во входном створе для Телецкого озера. Натурные наблюдения пространственной термической структуры водоема выполнены в летне-осенние месяцы 2010–2023 гг. Основные результаты выполненной работы следующие: выявленная сложная картина плотностной стратификации и плотностных течений в Телецком озере в период летнего нагревания водоема и основные факторы ее формирования; особенности распространения вод р. Чулышман в озере в летние месяцы.

Ключевые слова: плотностные течения, гидротермический режим, математическое моделирование, натурные наблюдения, Телецкое озеро, река Чулышман.

DOI: 10.31857/S0321059625020059 **EDN:** UCSJQB

ВВЕДЕНИЕ

Крупные озера и водохранилища России — ценные ресурсы пресных вод, использование и охрана которых имеют важное стратегическое значение. Данные водоемы также — надежные индикаторы изменения климата. Все это вызывает необходимость всестороннего изучения внутриводоемных процессов, определяющих состояние качества их водной среды и ее возможные изменения под влиянием природных и антропогенных факторов. Существенная составляющая данных исследований — изучение гидрологических и гидрофизических процессов и выявление определяющих их механизмов. Описанию ТГД-процессов в крупных пресных

озерах России (Ладожское, Онежское, Байкал) и мира (Северная Америка — Великие Американские озера, Африка) посвящены работы [1, 2, 7, 10, 12–15, 18, 19, 21, 22]. Различные модели ТГД-процессов в Телецком озере рассмотрены в работах [4–6, 11, 20].

Для больших пресных водоемов характерно формирование вертикальной плотностной стратификации, существенно влияющей на процессы тепло- и массопереноса. Для холодных глубоких озер процессы, определяющие формирование стратификации, имеют определенную специфику, связанную с влиянием давления воды при больших глубинах на температуру максимальной плотности. Данная ситуация характерна также для Телецкого озера и изучена в работах [5, 20]. При нагревании и охлаждении водоемов может наблюдаться такое явление, как термический бар, связанный с формированием горизонтальной плотностной стратификации водной массы. Наблюдения и расчеты термобара в Телецком

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН (проект “Изучение механизмов природных и антропогенных изменений количества и качества водных ресурсов Сибири с использованием гидрологических моделей и информационных технологий”), на базе ЦКП научно-исследовательскими судами ИВЭП СО РАН.

озере описаны в [4], где показано, что для данного водоема необходимо применение 3D-модели.

Следует отметить, что наличие крупных притоков, сложная морфометрия ложа, неоднородность метеорологических характеристик по акватории водоемов и сила Кориолиса могут существенно усложнить картину формирующейся плотностной стратификации и ее описание средствами математического моделирования. Самый крупный приток Телецкого озера — р. Чулышман, которая обеспечивает основной объем поступающей в водоем воды [8, 9].

Цель настоящей работы — изучение влияния Чулышмана на картину плотностных течений в Телецком озере в летний период года. Процессы формирования плотностной стратификации исследуются с использованием методов математического моделирования и натурных наблюдений. Построены компьютерные модели течений: 3D-модель для Телецкого озера и 2D-модель для устьевой части р. Чулышман, выполнено их сопоставление и проведены сопоставительные расчеты с данными натурных наблюдений. Изучены процессы формирования пространственной картины плотностной стратификации в Телецком озере, и выявлены определяющие ее факторы.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Телецкое озеро — самый глубокий пресноводный водоем Западной Сибири, расположено в истоке одной из крупнейших рек мира — Оби. В настоящее время озеро и его водосборный бассейн включены ЮНЕСКО в список объектов мирового наследия. Телецкое озеро представляет собой глубокий проточный водоем вытянутой формы. Длина озера равна 77.8 км, максимальная ширина — 5.2 км, максимальная глубина — 323 м. Объем озера — 41.1 км³ [3, 8, 9]. По принятой гидрологической классификации, Телецкое озеро относится к водоемам димиктического типа. В озеро впадает около 70 постоянных притоков и 150 временных. Основная часть стока поступает в Телецкое озеро через речную систему р. Чулышман (70—75%) в южной ее оконечности; из противоположной северной части озера вытекает р. Бия. Сезонные формирования и разрушения вертикальной и горизонтальной

температурной стратификации, ледостав (полный и частичный) в зимний период года, наличие плотностных течений и другие факторы обуславливают сложный гидрологический режим этого горного озера [4, 20].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ПОСТРОЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ

Термогидродинамические (ТГД) процессы в Телецком озере описываются с использованием 3D-модели в рамках гидростатического приближения и подхода Буссинеска [4]. Зависимость плотности воды от температуры, давления и минерализации определяется уравнением состояния TEOS-10 [17]. Для описания турбулентных течений используется к-ε-модель.

Для расчета по 3D-модели требуется определить граничные и начальные условия. Для озера на границе вода—воздух задаются тепловые потоки и ветровая нагрузка с учетом нестационарных и неоднородных метеорологических условий. На твердых границах тепловые потоки и скорости течения считаются равными нулю. В общем случае во входных створах (устья притоков) задаются расходы воды, в выходных створах — уровни поверхности воды. В Телецком озере ТГД-процессы рассчитываются от устья р. Чулышман (входной створ) до истока р. Бии (выходной створ). Помимо р. Чулышман учитываются притоки впадающих в озеро рек Кыга и Камга. В качестве начальных условий для 3D-модели Телецкого озера задаются уровень поверхности воды, нулевая скорость течения и температура воды 3°С на 1 июня.

Для расчетов ТГД-процессов на устьевом участке р. Чулышман используется 2DH-модель мелкой воды. Для задания сопротивления в р. Чулышман принята модель Маннинга и задан постоянный коэффициент шероховатости 0.025, характерный для крупных водотоков. Расчетная область для устьевых участков р. Чулышман в зависимости от расхода воды и уровня водной поверхности озера существенно меняется: многоорукавное русло сменяется одноорукавным или наоборот. Поэтому меняется количество входных и выходных створов. Во входных створах задаются расходы воды как функции времени,

в выходных створах — уровни поверхности воды. Для задания начальных условий для 2ДН-модели используется решение квазистационарной задачи для суммарного расхода воды во входных створах и заданного уровня воды в выходных створах на 1 июня расчетного года.

Следует отметить, что при построении совместной компьютерной модели течения в р. Чулышман (2ДН) и течения в Телецком озере (3Д) наиболее трудоемкой задачей при определении граничных условий оказалась передача расчетных данных из выходного створа р. Чулышман в входной створ Телецкого озера. Поскольку используемый пакет Delft3D 4 [16] предполагает задание только общего расхода воды во входном створе, то пришлось каждую грань расчетных ячеек этого створа интерпретировать как отдельный входной створ. Так как таких граней оказалось почти 200, то меняющуюся во времени информацию по каждому входному створу требуется передать почти 200 раз за расчетный период, что выполнить вручную достаточно трудоемко. Поэтому была разработана специальная утилита, которая генерировала файлы граничных условий для компьютерной 3Д-модели Телецкого озера, что решило проблему передачи большого объема данных для более точного задания граничных условий во входных створах.

Для отслеживания распространения воды р. Чулышман в Телецком озере используется метод трассеров. Динамика взвешенных речных наносов и трассеров описывается уравнением (1):

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_c)C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_{c,x} \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_{c,y} \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_{c,z} \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где C — объемная доля воды р. Чулышман или безразмерная концентрация взвешенных наносов; t — время; x, y, z — декартовы координаты; u, v, w — компоненты скорости потока воды; w_c — гидравлическая крупность; $\epsilon_{c,x}, \epsilon_{c,y}, \epsilon_{c,z}$ — коэффициенты эффективной диффузии, которые определяются с использованием к-ε-модели турбулентности. В начальный момент времени во всем объеме Телецкого озера полагается $C = 0$. Во входном створе — устье р. Чулышман — задается граничное условие $C = 1$. Подчеркнем, что

для расчета распространения воды р. Чулышман гидравлическая крупность для трассера полагается равной нулю, в то время как для расчета концентрации взвешенных наносов эта величина больше нуля.

Важный этап построения компьютерной модели — создание цифровых моделей рельефа (ЦМР) котловины Телецкого озера и устьевой части русла р. Чулышман. Эти модели построены путем обработки ранее полученных в ИВЭП СО РАН натурных данных (ЦМР в формате, пригодном для использования в Delft3D, показаны на рис. 1).

Следующий этап работ при компьютерном моделировании в пакете Delft3D 4 — генерация структурированной конечно-разностной сетки. При этом необходимо было учитывать противоречивые требования. С одной стороны, сетка должна быть достаточно подробной, чтобы обеспечить точность расчетов; содержать оптимальное количество ячеек для минимизации времени расчетов; быть криволинейной для учета сложной морфометрии озерной котловины. С другой стороны, грани ячейки должны быть близки к ортогональным, отношение длин граней внутри ячейки должны быть близки к единице, отношение длин граней соседних ячеек должны не слишком отличаться.

Особенность разрабатываемой компьютерной ТГД-модели — использование 2ДН-модели для описания устьевых участков р. Чулышман и 3Д-модели — для Телецкого озера. Требования к этим моделям различные. Для речного участка важно прежде всего детальное описание ТГД-процессов вдоль русла; для озерной части — как по длине водоема, так и по глубине. С учетом этого сеточная область разбивается на две подобласти таким образом, чтобы выходное сечение расчетной области для р. Чулышман совпадало с входным сечением расчетной области озера (рис. 2). В результате построены 2 расчетные сетки следующих размеров: на устьевом участке р. Чулышман — 235×403 ячеек, для Телецкого озера — $436 \times 501 \times 60$ ячеек.

Поскольку уклон поверхности воды Телецкого озера малый, была принята следующая

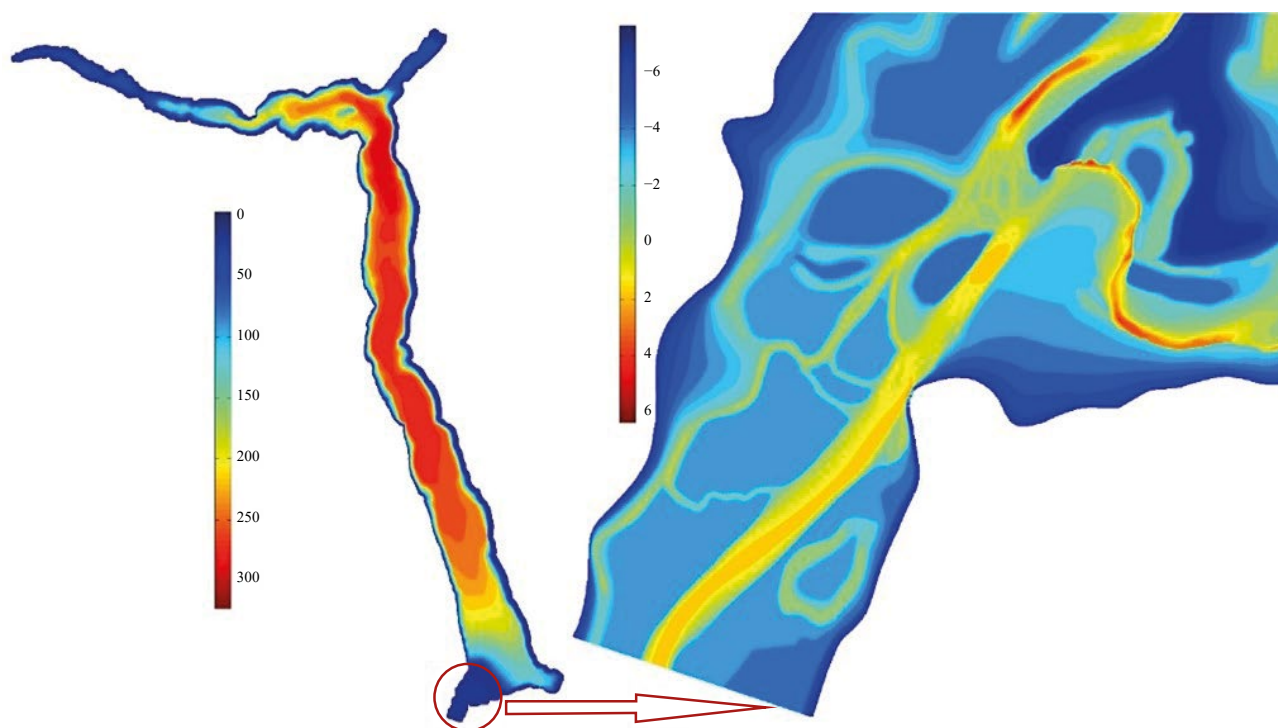


Рис. 1. ЦМР Телецкого озера и устья р. Чулышман. Шкалы отсчитываются от отметки 434 м БС и могут интерпретироваться как аналоги глубины.

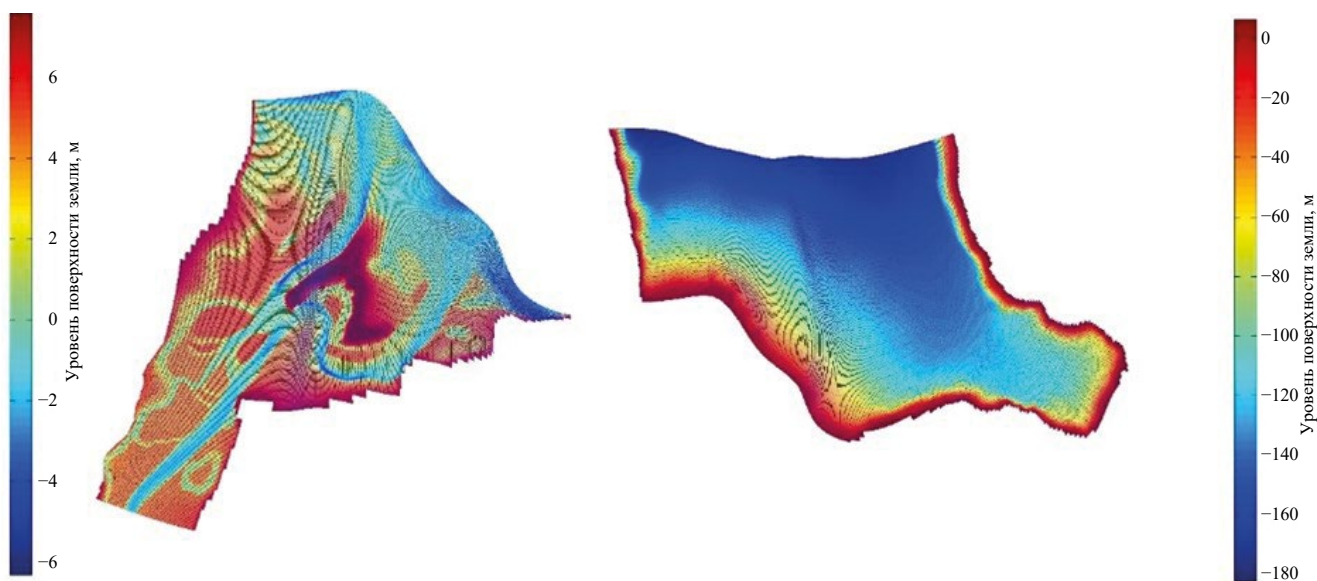


Рис. 2. Фрагменты расчетных сеток: слева — для р. Чулышман, справа — для Телецкого озера в районе устья р. Чулышман.

методика компьютерного моделирования: сначала выполняется расчет течения р. Чулышман по 2DH-модели при задании в выходном створе уровня водной поверхности Телецкого озера, а затем проводится расчет ТГД-процессов в Телецком озере по 3D-модели с использованием во входном створе рассчитанных скоростей течений р. Чулышман.

Отметим, что при расчетах ТГД-процессов в Телецком озере температура воды р. Чулышман полагалась изменяющейся во времени по гармоническому закону: в 6 ч равна 4°C, а в 18 ч – 9°C. Прочая требующаяся гидро- и метеоинформация задавалась соответствующей фактическим данным для 2013 г.

В результате выполненных работ построена комбинированная 2DH/3D-компьютерная модель ТГД-процессов в устье р. Чулышман и Телецком озере, позволяющая выполнять расчеты с высокой степенью пространственно-временной детализации.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные натурные данные и результаты расчетов ТГД-процессов в Телецком озере [4,

20] показали следующее. В начале лета температура воды практически во всем Телецком озере близка к 3°C. В июне вода в мелководных прибрежных частях Телецкого озера прогревается быстрее, чем в ее глубоководной области; в прогреваемых частях Телецкого озера наблюдается формирование термоклина. К концу июня в водоеме появляется термобар, фронты которого наблюдаются до второй половины июля. В августе температура во всем поверхностном слое воды озера устанавливается вблизи 15–16°C. На больших глубинах температура воды $\leq 3.5^\circ\text{C}$ [4, 20]. Результаты выполненных расчетов находятся в хорошем соответствии с данными натурных наблюдений по форме и положению термобара, распространяющегося в южной оконечности озера в летний период.

Одно из преимуществ метода математического моделирования – возможность варьировать параметры модели и входную информацию для оценки их влияния на результаты вычислений. К примеру, развитие термобара в Телецком озере в период нагревания зависит от ряда факторов: морфометрии, метеорологических условий, расходов в притоках и т. д. С использованием компьютерной модели можно изучить причины формирования “косого” термобара

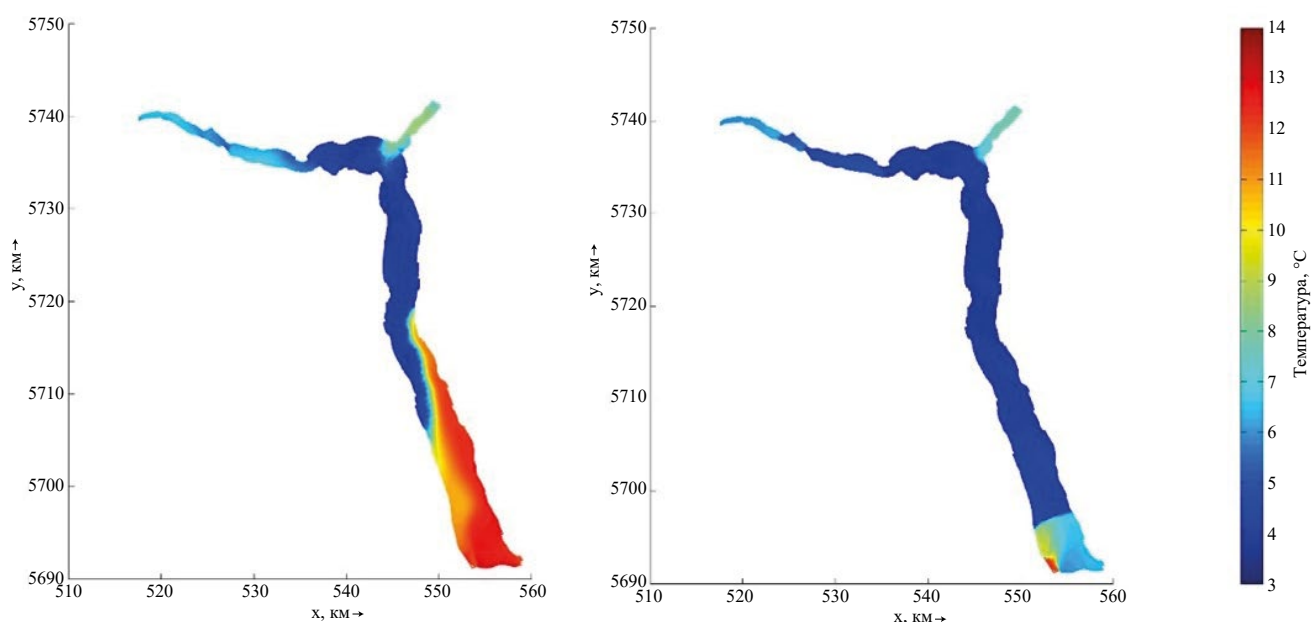


Рис. 3. Рассчитанное положение фронта термобара при бытовых условиях (слева) и при отсутствии силы Кориолиса (справа). Использована система координат Pulkovo 1942 / Gauss-Kruger 15N (EPSG:28475).

[4]. В числе данных причин могут быть расход р. Чулышман и сила Кориолиса [2]. Выполненные расчеты показали, что величины расхода р. Чулышман существенно определяют положение фронта термобара. При пренебрежении расходом речной воды фронт термобара распространяется существенно медленнее, не изменяя формы. На рис. 3 показано влияние учета силы Кориолиса на температуру поверхности воды Телецкого озера. При прочих одинаковых условиях результаты расчета, показанные на правом рисунке, получены при пренебрежении силой Кориолиса. Это привело как к значительному изменению положения фронта термобара, так и к его развороту практически на 90° .

Данные результаты поясняют основную причину формирования “косого” фронта термобара, наблюдающегося в Телецком озере. Также следует отметить, что недооценка роли данного фактора при моделировании температурного режима Телецкого озера приводит к нереалистичным результатам. К таким же результатам приводит использование моделей, полученных путем осреднения уравнений по ширине водоема, по-

скольку картина температурной стратификации является существенно трехмерной [4, 8, 20].

При оценке влияния р. Чулышман на ТГД-процессы в Телецком озере следует учесть то обстоятельство, что взвешенные речные наносы при относительной малой глубине реки и высокой скорости течения можно считать равномерно распределенными по сечению русла. В Телецком озере скорости течений малы, а глубины много больше, чем в р. Чулышман. В этом случае движение взвешенных наносов в Телецком озере необходимо рассматривать в двухфазной постановке с применением уравнения (1). Поскольку массовые концентрации взвешенных наносов в речной воде и в воде Телецкого озера весьма малы, то применяется предположение о малом влиянии наносов на поле скорости воды. При моделировании также полагается, что минерализация воды в р. Чулышман и Телецком озере мала, слабо влияет на плотностную стратификацию и принята постоянной величиной, равной 0.06‰ с учетом натурных данных. Результаты расчетов распространения воды р. Чулышман в Телецком озере представлены на рис. 4–6.

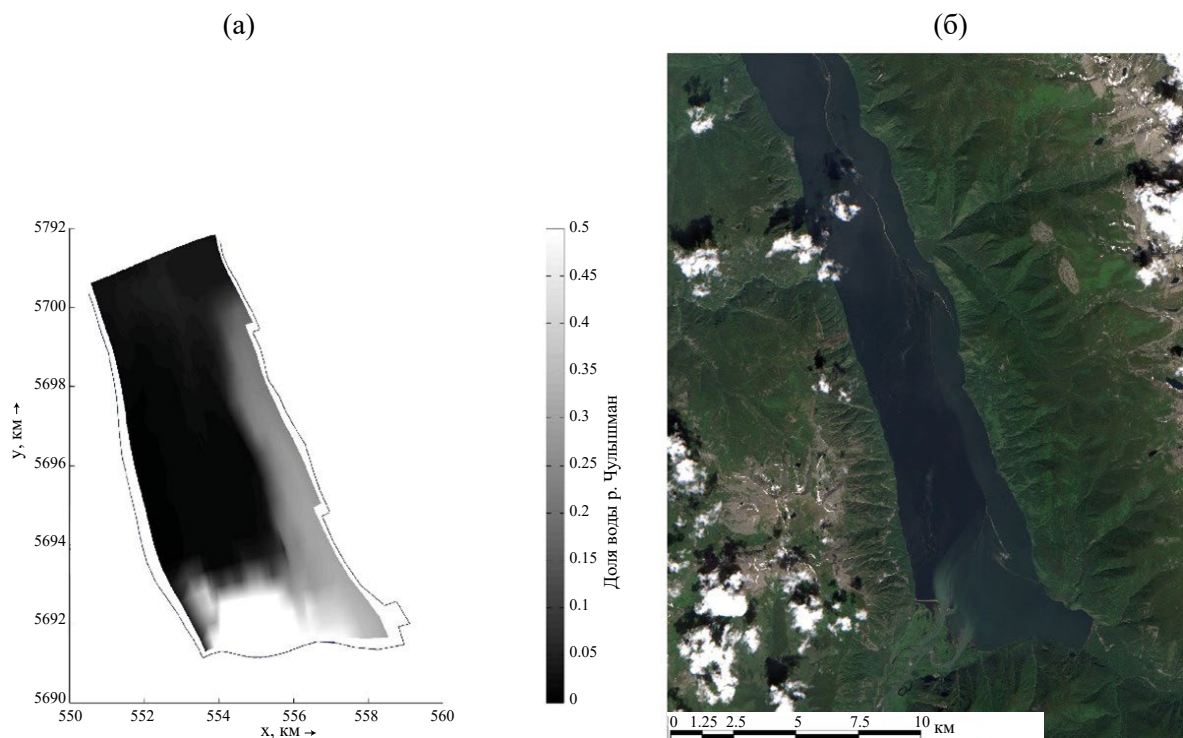


Рис. 4. а — рассчитанная доля воды р. Чулышман на 28.06.2018; б — снимок спутника Sentinel-2 от 28.06.2018.

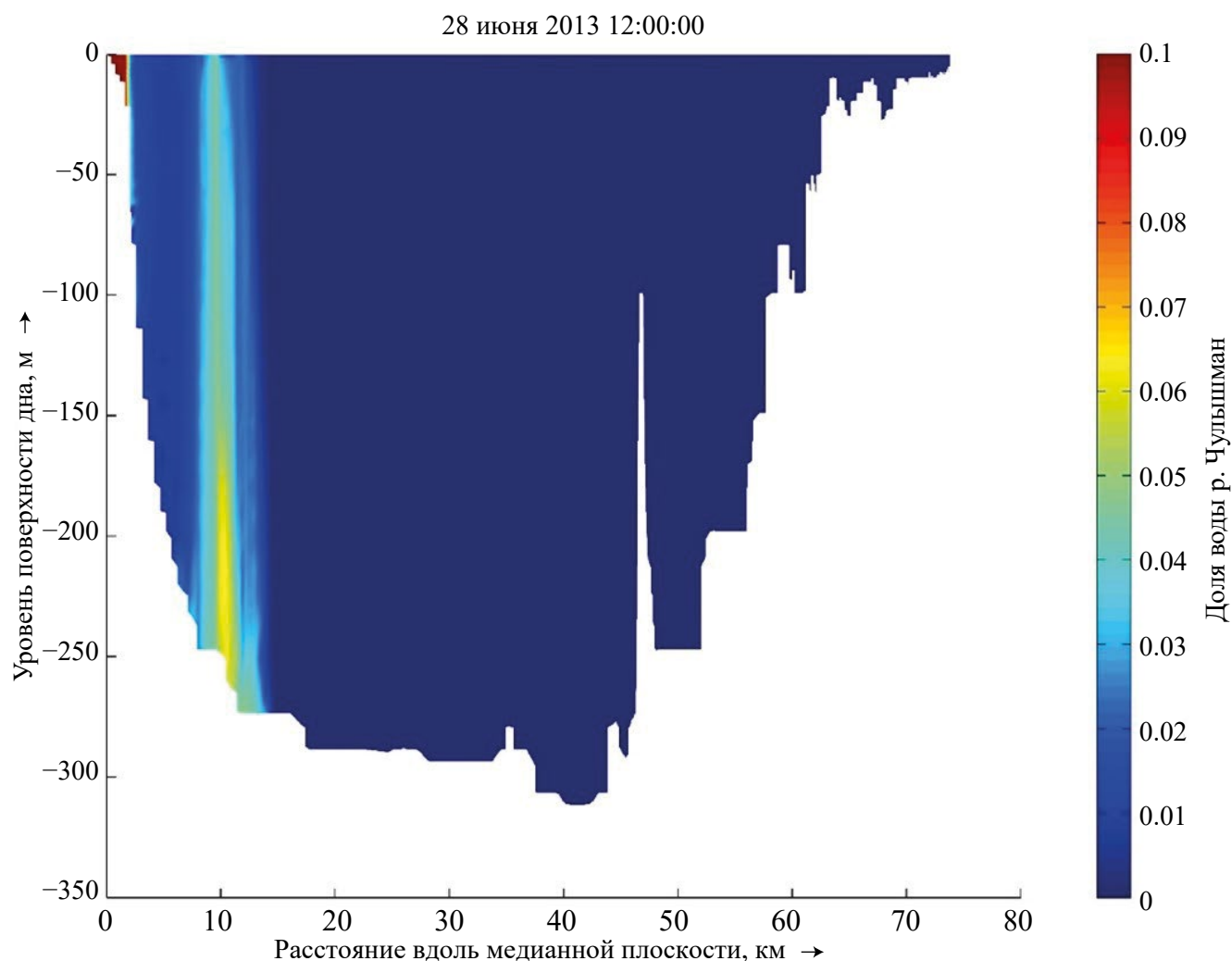


Рис. 5. Распределение доли воды р. Чулышман вдоль медианной плоскости Телецкого озера на 28 июня 2013 г. Слева – устье р. Чулышман, справа – исток р. Бии.

На рис. 4 представлены результаты расчетов распределения воды р. Чулышман в южной оконечности Телецкого озера на 28 июня и космоснимок этого же участка озера на эту дату. Содержание воды р. Чулышман на поверхности Телецкого озера, поступившей с 1 июня, на рис. 4а показано в долях. На рис. 4а и 4б отчетливо видно, что речная вода распространяется вдоль правого берега озера. Некоторые различия размеров области речной воды на рис. 4а и 4б можно объяснить неточной оценкой расхода р. Чулышман, используемого в расчетах. Изменение тона поверхности воды на рис. 4б может быть вызвано присутствием в речной воде взвешенных наносов. Происхождение этих наносов может быть различным: либо эти наносы состоят из мелко-

дисперсной фракции, либо их плотность меньше плотности воды (пыльца с растений). Для точного определения состава взвешенных наносов требуются дополнительные исследования.

Факт распространения воды р. Чулышман вдоль правого берега на всех глубинах озера также иллюстрирует рис. 5, где представлено рассчитанное распределение речной воды относительно геометрического центра водоема на 28 июня. Естественно, что речная вода отмечается в районе устья р. Чулышман (выделено в левой части рис. 5). Однако только через 10 км от устья Чулышмана речная вода, поступающая с 1 июня, попадает в область центра озера. Данный подход, основанный на использовании ме-

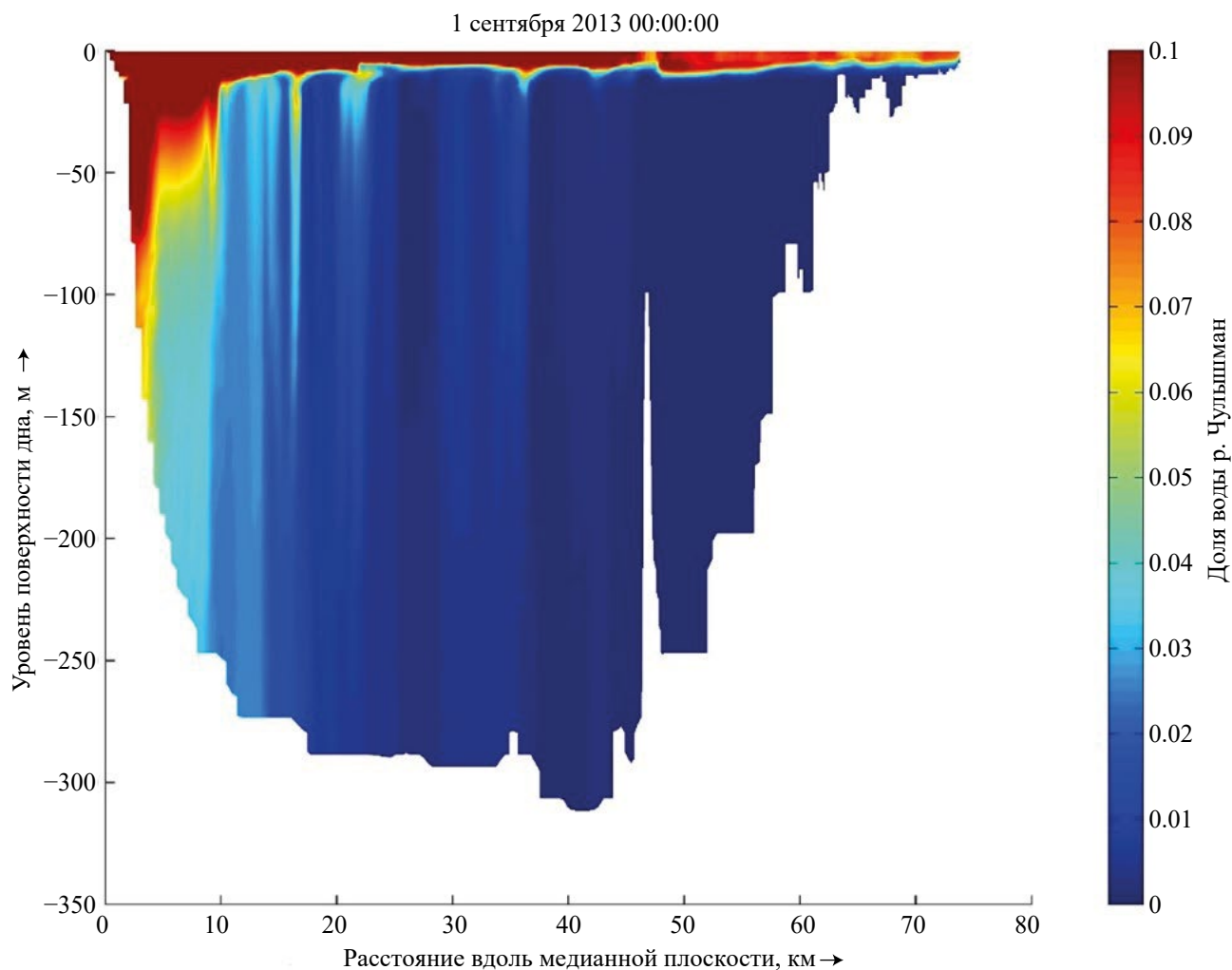


Рис. 6. Распределение доли воды р. Чулышман вдоль медианной плоскости Телецкого озера на 1 сентября 2013 г. Слева — устье р. Чулышман, справа — исток р. Бии.

тода трассеров, позволяет говорить о качественном и количественном соответствии результатов расчетов и данных наблюдений.

На рис. 6 представлены результаты расчетов распределения воды р. Чулышман, поступившей за летние месяцы, вдоль медианной плоскости Телецкого озера на 1 сентября. Видно, что вода р. Чулышман, распространяющаяся, в основном, у водной поверхности (на глубинах до 30 м), уже достигла района истока р. Бии. При этом на значительных глубинах (>50 м) озера вода Чулышмана практически не наблюдается далее 10 км от южной оконечности озера. Расчеты показывают, что на глубинах > 100 м формируется большая рециркуляционная зона в окрестности хребта им. Софьи Лепнёвой. Профиль хребта отчетливо

виден на рис. 5, 6; на рис. 7 показано распределение скоростей в районе подводного хребта на глубине 150 м. Можно предположить, что именно данный топографический вихрь препятствует распространению вод р. Чулышман в центральной части Телецкого озера на больших глубинах в течение летних месяцев. Хотя вся водная масса Телецкого озера в основном формируется водой р. Чулышман, этот факт численно может быть подтвержден лишь расчетами для многолетнего периода. Выполненные расчеты дают основания полагать, что обновление вод Телецкого озера на больших глубинах происходит гораздо реже, чем вод в приповерхностной его части.

Расчеты распространения в озере взвешенных речных наносов с типичными характеристика-

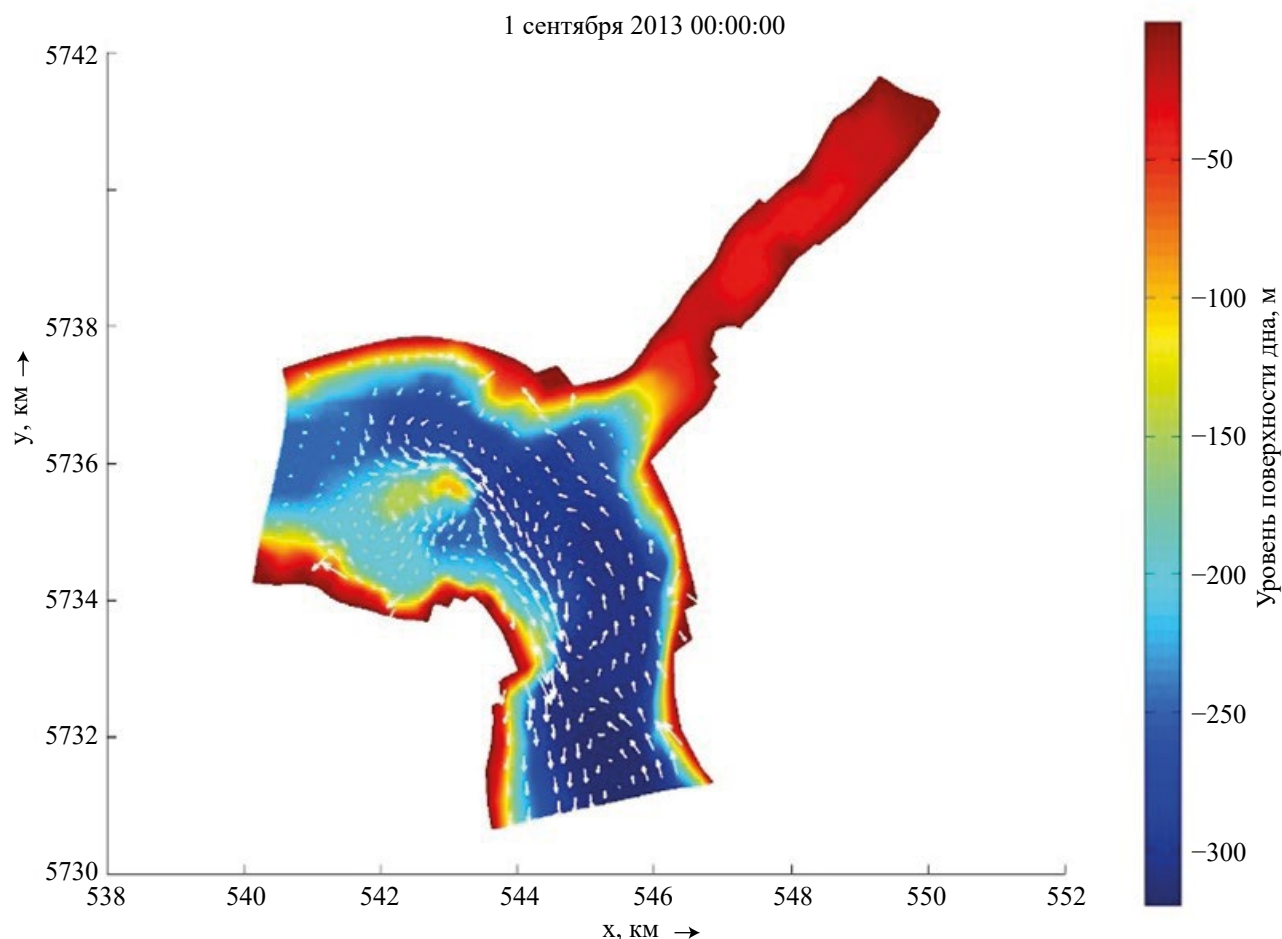


Рис. 7. Нормализованное поле скорости воды на глубине 150 м в районе подводного хребта им. Софьи Лепнёвой.

ми — плотность 2500 кг/м^3 и медианный диаметр частиц 0.25 мм — показали, что данные частицы быстро осаждаются на дно (на расстоянии $\leq 500 \text{ м}$ от устья р. Чулышман).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для изучения специфических особенностей, связанных с распространением вод р. Чулышман в Телецком озере, построена комбинированная компьютерная 2DН/3D-модель ТГД-процессов в области “устьевой участок р. Чулышман — Телецкое озеро” с использованием пакета Delft3D.

Результаты расчетов с использованием данной модели позволили объяснить причину “косо-го” фронта весенне-летнего термобара, формирующегося в южной оконечности Телецкого озера. Данный факт в основном обусловлен действием силы Кориолиса. Существенным вы-

водом является необходимость использования 3D-моделей ТГД-процессов при имитационных и прогностических расчетах формирования распространения термобара в Телецком озере.

Расчеты пространственно-временного распространения вод р. Чулышман в Телецком озере в летний период года показали, что основная часть речных вод в летние месяцы распространяется в верхних слоях озера. Возможной причиной данного обстоятельства может быть топографический вихрь, формирующийся в районе хребта им. Софьи Лепнёвой и препятствующий распространению вод р. Чулышман в глубинной части озера. Поступающие в озеро взвешенные речные наносы характерной гидравлической крупности достаточно быстро осаждаются на дно водоема.

Поскольку в летний период года обновления глубинных вод Телецкого озера не происходит,

данная проблема требует своего дальнейшего изучения с учетом других источников поступления вод в озеро, в том числе притока подземных вод. По некоторым имеющимся данным, в отдельные месяцы доля подземного притока достигает 10–18% [9].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блохина Н.С., Селин Д.И. Формирование весеннего термобара в водоеме со сложным рельефом дна (на примере Ладожского озера) // Вестн. Московского ун-та. Сер. 3, Физика. Астрономия. 2019. № 1. С. 58–63.
2. Блохина Н.С., Соловьев Д.А. Влияние эффекта Кориолиса на термодинамические процессы в водоеме при развитии термического бара // Вестн. Московского ун-та. Сер. 3, Физика. Астрономия. 2010. № 3. С. 44–48.
3. Буслов М.М., Высоцкий Е.М., Де Батист М., Дельво Д., Дехандсхюттер Д., Дучков А.Д., Казанцев С.А., Калугин И.А., Клеркс Я., Селегей В.В., Селезнев В.С., Смирнова Л.В., Соловьев В.М., Тениссен К. Физико-географическая и геологическая характеристика Телецкого озера. Тервюрен, Бельгия: Королевский Музей Центральной Африки, 2001. 310 с.
4. Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Дьяченко А.В., Марусин К.В. Численное моделирование и натурные исследования термобара в Телецком озере // Метеорология и гидрология. 2021. № 5. С. 86–94. DOI: 10.52002/0130-2906-2021-5-86-94
5. Кwon Д.В., Кwon 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.
6. Пушистов П.Ю., Викторov Е.В. Прикладной системный анализ циркуляций и термического режима Телецкого озера. Барнаул: Пять плюс, 2016. 152 с.
7. Самолубов Б.И., Иванова И.Н. Динамика вод и диффузия примесей в Онежском озере при разной устойчивости плотностной стратификации // Вестн. Московского ун-та. Сер. 3, Физика. Астрономия. 2019. № 1. С. 80–85.
8. Селегей В.В. Телецкое озеро: очерки истории: в 3 кн. Новосибирск; Горно-Алтайск: Алтайский гос. биосфер. заповедник, 2009. 119 с.
9. Селегей В.В., Селегей Т.С. Телецкое озеро. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 142 с.
10. Цыденов Б.О. Влияние ветра и рельефа дна на динамику осеннего термобара (на примере оз. Байкал) // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 5. С. 381–386. DOI: 10.15372/AOO20230508
11. Шлычков В.А. Численные модели для описания пространственной структуры течений в водоемах сложной морфометрии // Водные проблемы крупных речных бассейнов и пути их решения. Барнаул: Агентство рекламных технологий, 2009. С. 379–391.
12. Boehrer B., Golmen L., Løvik J.E., Rahn K., Klavenness D. Thermobaric stratification in very deep Norwegian freshwater lakes // J. Great Lakes. 2013. V. 39. № 4. P. 690–695. DOI: 10.1016/j.jglr.2013.08.003
13. Burlakova L.E., Karatayev A.Y., Hrycik A.R., Daniel S.E., Mehler K., Hinchey E.K., Dermott R., Griffiths R., Denecke L.E. Density data for Lake Erie benthic invertebrate assemblages from 1930 to 2019 // Ecol. V. 105. № 5. DOI: 10.1002/ecy.4301
14. Carmack E., Vagle S. Thermobaric Processes Both Drive and Constrain Seasonal Ventilation in Deep Great Slave Lake, Canada // J. Geophys. Res.: Earth Surface. 2021. V. 126. № 12. P. e2021JF006288. DOI: 10.1029/2021JF006288
15. Choi S., Kim D., Seo I. Stratified features in Paldang lake considering induced density currents and seasonal thermal effect // J. Korea Water Resour. Assoc. 2024. V. 57. № 2. P. 99–110. DOI: 10.3741/JKWRA.2024.57.2.99
16. Deltares. Delft3D-FLOW User Manual. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. Version: 3.15.52614, 1 October 2017.
17. Feistel R. TEOS-10: A New International Oceanographic Standard for Seawater, Ice, Fluid Water, and Humid Air // Int. J. Thermophys. 2012. V. 33. P. 1335–1351. DOI: 10.1007/s10765-010-0901-y
18. Filatov N.N., Trifonova I.S., Rummyantsev V.A. Achievements of the Russian Academy of Sciences in Studies of Lakes over Three Centuries (A Review) // Water Resour. 2024. V. 51. № 4. P. 355–372. DOI: 10.1134/S0097807824700908
19. Johnson L. Temperature of Maximum density of fresh water and its effect on circulation in Great Bear Lake // J. Fisheries Res. Board of Canada. 1966. V. 23. № 7. P. 963–973. DOI: 10.1139/f66-089
20. Koshelev K.B., Zinoviev A.T., De Goede E., De Graaff R. Modelling of Thermal Stratification and Ice Dynamics with Application to Lake Teletskoye, Altai Republic, Russia // Water Resour. 2021. V. 48. № 3. P. 368–377. DOI: 10.1134/S0097807821030088

21. *Kranenburg W., Tiessen M., Veenstra J., De Graaff R., Uittenbogaard R., Bouffard D., Sakindi G., Umutoni A., Van de Walle J., Thiery W., Van Lipzig N.* 3D-modelling of Lake Kivu: Horizontal and vertical flow and temperature structure under spatially variable atmospheric forcing // *J. Great Lakes Res.* 2020. V. 46. № 4. P. 947–960. DOI: 10.1016/j.jglr.2020.05.012
22. *Shimaraev M.N., Granin N.G., Zhdanov A.A.* Deep ventilation of Lake Baikal waters due to spring thermal bars // *Limnol. Oceanogr.* 1993. V. 38. № 5. P. 1068–1072. DOI: 10.4319/lo.1993.38.5.1068

Studying the influence of the Chulyshman River waters on thermohydrodynamic processes of Lake Teletskoye in summer

A. T. Zinoviev*, K. B. Koshelev, A. V. Dyachenko

Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia

**e-mail: lgg-iwep@yandex.ru*

The Chulyshman River influence on the formation of density stratification of Lake Teletskoye in summer is considered. The relevance of this problem is determined by the importance of studying the specific features of the processes of impurity and pollutant transfer under the conditions of thermocline and thermal bar formation and water renewal in the lake. The above-mentioned problems are solved using the mathematical modeling methods and field data. To consider thermohydrodynamic processes in deep Lake Teletskoye and the Chulyshman River, the computer models have been built based on the open Delft3D package. For the lake, it is an improved 3D model and for the flow of the Chulyshman River in its mouth - a planned (2DH) model. The conjugation of 3D and 2DH models was implemented at the inlet of Lake Teletskoye. Field observations of the spatial thermal structure of the reservoir were carried out in the summer-autumn months of 2010–2023. The main results of the work performed are as follows: the revealed complex picture of density stratification and density currents in Lake Teletskoye during the period of summer heating of the reservoir and driving factors of its formation, distribution features of the Chulyshman River waters within the lake in summer.

Keywords: density currents, hydrothermal regime, mathematical modeling, field observations, Lake Teletskoye, Chulyshman River.