

УДК 556.555.4

МОДЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕРМИЧЕСКОГО И ЛЕДОВОГО РЕЖИМА КРУПНОГО РАВНИННОГО ВОДОХРАНИЛИЩА (НА ПРИМЕРЕ НОВОСИБИРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА)¹

© 2024 г. А. Н. Семчуков^{a, *}, А. А. Цхай^{a, b}, В. В. Кириллов^a^a Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения РАН, Барнаул, 656038 Россия^b Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, 656038 Россия

*e-mail: a.semchukov@inbox.ru

Поступила в редакцию 18.07.2023 г.

После доработки 07.11.2023 г.

Принята к публикации 25.11.2023 г.

На основе программного комплекса Дельфт3Д (Delft3D), дополненного ледовым модулем, создана трехмерная численная модель термических процессов в Новосибирском водохранилище. По результатам расчета за 1981 г. выполнен анализ термического и ледового режима водохранилища в годовом цикле. Результаты расчета температуры воды сопоставлены с данными наблюдений и усреднены для поверхностного, придонного и среднего слоев характерных районов водохранилища. Модель может быть использована как основа для моделирования экологических процессов и принятия управленческих решений по оптимизации использования водных ресурсов водохранилища.

Ключевые слова: Новосибирское водохранилище, математическое моделирование, гидротермический режим, термический режим, ледовый режим, температура воды, лед, трехмерная модель.

DOI: 10.31857/S0321059624030044 EDN: AUUODK

ВВЕДЕНИЕ

Самое крупное в Западной Сибири Новосибирское водохранилище относится к водохранилищам руслового типа с сезонным регулированием стока и представляет собой пойму р. Оби, затопленную при строительстве Новосибирской ГЭС, условно делится на речную часть протяженностью ~120 км (от г. Камень-на-Оби до с. Завьялово) и озерную часть протяженностью 65 км (от с. Завьялово до плотины ГЭС, рис. 1). Не считая р. Оби, водохранилище имеет >40 мелких притоков и один крупный, р. Бердь, впадающую в него в районе плотины и образующую Бердский залив. При нормальном подпорном уровне (НПУ) 113.5 м площадь зеркала водохранилища равна 1070 км², объем — 8.8 км³, максимальная ширина ~18 км, максимальная глубина — до 25 м. Уровень мертвого объема (УМО) — 108.5 м, полезный объем — 4.4 км³ [2].

Средний многолетний коэффициент водообмена за 1959–2001 гг. составил 6.64 [12].

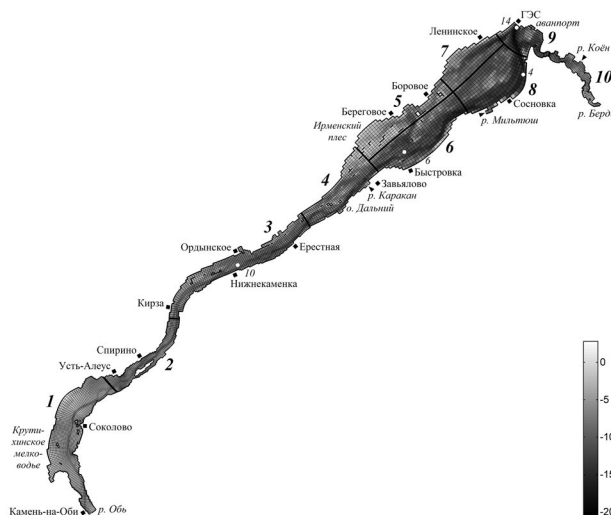


Рис. 1. Расчетная сетка, уровень дна в ее ячейках относительно НПУ (м), характерные районы Новосибирского водохранилища. Кружки — рейдовые вертикали, малые цифры — их номера, большие цифры — номера районов.

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания ИВЭП СО РАН и при поддержке РФФИ (проект 18-41-220002 p_a).

Водохранилище — важный источник водоснабжения городов Новосибирска и Бердска, а также других населенных пунктов, расположенных на его берегу, объект электроэнергетики, рекреации, транспортного и рыбохозяйственного использования, что придает большое значение исследованию и прогнозированию состояния его водной экосистемы, а значит и термического режима.

Сложная морфометрия дна водохранилища вследствие сочетания затопленного русла р. Оби с относительно большими глубинами и обширных застойных мелководных зон — определяющий фактор пространственной неоднородности гидрологических характеристик.

В настоящее время большое внимание уделяется математическому моделированию термического режима крупных равнинных водохранилищ. Примерами таких работ могут служить публикации [14, 15, 35]. Однако Новосибирское водохранилище в этом отношении исследовано недостаточно.

В свое время в ИВЭП СО РАН была создана плановая, т. е. двухмерная горизонтальная модель течений и термического режима Новосибирского водохранилища, позволившая выявить влияние мелководий на распределение температуры воды [9]. Однако расчеты проводились только для безледного периода при постоянных расходах притоков и постоянном среднем уровне воды, т. е. фактически решалась модельная задача. Вертикальное распределение температуры (стратификация) не учитывалось, поскольку модель предполагала усреднение по глубине. Также В.А. Шлычковым по моделям различной размерности были выполнены расчеты течений, русловой деформации, переноса взвешенных наносов и консервативной примеси в Новосибирском водохранилище без учета влияния температуры [11]. В частности, выполнен расчет трехмерного распределения скоростей течения в районе плотины ГЭС. В [7, 23] приведены результаты расчетов течений в рассматриваемом водоеме по плановой модели.

В [24] представлена трехмерная модель термогидродинамических процессов в Новосибир-

ском водохранилище и приведены результаты предварительных расчетов распределения температуры воды по акватории и глубине в 1981 г. В расчетах использовался упрощенный рельеф ложа водохранилища, верхняя часть которого лишь частично вошла в расчетную область. Ход уровня воды искусственно ограничивается диапазоном УМО и НПУ, хотя в 1981 г. произошло снижение уровня по сравнению с УМО на 1.28 м. Кроме того, при расчете толщины льда не учитывался снежный покров.

Цель данной работы — создание трехмерной модели термического и ледового режимов Новосибирского водохранилища в рамках проекта по созданию математической модели водной экосистемы данного водоема. Для этого использовался программный комплекс Дельфт3Д (Delft3D) [17], дополненный ледовым модулем, описывающим изменения толщин льда и снега на нем за счет происходящих в них термических процессов и представляющим из себя модификацию ледового модуля разработки компании “Дельтарез” (“Deltares”) [19, 20, 22].

Модель использована для расчета изменения распределения температуры воды и толщины льда на различных участках водохранилища с ноября 1980 г. по декабрь 1981 г., а также для определения сроков установления ледового покрова и очищения ото льда. С учетом задач моделирования качества воды результаты расчетов были усреднены для поверхностного, придонного и среднего слоев десяти характерных районов водохранилища (рис. 1). Также был рассчитан водообмен между ними.

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

В основе программного комплекса Дельфт3Д (Delft3D) лежит классическая трехмерная модель течений и термогалинного режима относительно неглубокого водоема, т. е. уравнения Рейнольдса в гидростатическом приближении и приближении Буссинеска (многослойные уравнения мелкой воды), дополненные моделями турбулентного обмена, уравнениями переноса примеси и тепла, уравнением состояния и соответствующими граничными условиями [17]. Уравнения модели записываются в криволинейной орто-

гональной системе координат, определяемой в плане линиями используемой расчетной сетки. Программный комплекс позволяет учитывать осушение и затопление дна (ячеек расчетной сетки) при изменении уровня воды.

В расчетный период половодья 1981 г. перепад между уровнями гидрологического поста Камень-на-Оби, находящегося в зоне выклинивания подпора, и верхнего бьефа (т. е. плотины ГЭС) составлял >7 м [5, 6], что близко к средней глубине водоема. Годовое изменение уровня в верхнем бьефе составило 6.5 м, а существенная стратификация наблюдалась только в приплотинной части водохранилища в июне [6].

Поэтому в связи со значительными перепадами уровня воды расчет велся в σ -координатах. Замена переменных: $\sigma = (z - \xi)/(\xi - z_b)$ (ξ – уровень свободной поверхности воды, z_b – уровень дна) позволяет при расчете разделить водоем во всех точках на одинаковое число слоев одинаковой относительной толщины. Использование σ -координат открывает возможность вести расчет течений со значительным изменением уровня воды во времени и пространстве, однако в этом случае может хуже описываться стратификация, так как имеет место искусственное перемешивание по вертикали, особенно при использовании грубой расчетной сетки.

Для расчета горизонтального обмена использовались постоянные коэффициенты турбулентной вязкости и турбулентной теплопроводности. Вертикальный турбулентный обмен рассчитывался с помощью алгебраической модели [16, 17], причем плотность воды определялась по формуле ЮНЕСКО [17, 27]. Соппротивление трения о дно определялось исходя из коэффициента Маннинга $n = 0.025 \text{ с/м}^{1/3}$ (значение, широко используемое для расчета течения в реках) [17].

Тепловой поток через свободную поверхность воды и интенсивность испарения в безледный период вычислялись по “Океанической” (“Ocean”) модели [17, 18]. Учитывалась зависимость от поверхностной температуры и метеорологических элементов: температуры воздуха, облачности, относительной влажности, скорости ветра, интенсивности и температуры осадков, а также солнеч-

ной радиации, определяемой в зависимости от географической широты и времени.

Используемый ледовый модуль представляет из себя модификацию ледового модуля разработки компании “Дельтарез” (“Deltares”) [19, 20, 22], который, в свою очередь, основан на модели ЛИМ-3 (LIM-3) [26]. Он состоит [22] из термодинамического блока, основанного на однослойной концепции льда со снегом сверху [29], и динамического блока на основе упруговязкопластической реологии морского льда [21]. Первый блок описывает процессы роста и таяния снежно-ледового покрова, а второй – его трансформацию за счет внешних механических нагрузок, причем расчет последнего может быть отключен пользователем, что и сделано в этой работе.

Термодинамический блок был полностью переработан. Как и в оригинале, предполагается квазистационарное распределение температуры по толще снежно-ледового покрова, что вызывает необходимость нахождения равновесной температуры его верхней поверхности исходя из непрерывности теплового потока на ней. Однако в оригинале при решении соответствующего уравнения температура считалась неизвестной величиной только в радиационном компоненте теплового потока от снежно-ледового покрова в атмосферу, а во всех других компонентах использовалось ее значение на предыдущем временном шаге. Предварительные расчеты показали, что при резком изменении погоды это может привести к нефизическому изменению толщины льда. Поэтому в переработанном блоке, согласно методике [28, 34], температура считается неизвестной во всех компонентах теплового потока.

Нарастание и таяние льда происходили снизу. Также сверху происходит таяние снега или льда, когда невозможно найти равновесную температуру ниже температуры замерзания.

На границе между водой и льдом тепловой поток считался пропорциональным разности между поверхностной температурой воды и температурой замерзания. Остальные граничные условия на поверхности раздела вода–лед по сравнению с оригинальным модулем не менялись.

Программный комплекс основан на использовании неявного конечно-разностного метода переменных направлений (ADI) второго порядка точности по времени и пространству [17, 25]. Для описания адвективных членов в уравнениях движения и переноса тепла был применен “Циклический” (“Cyclic”) метод [17, 30].

Программный комплекс использует так называемую разнесенную сетку, т. е. в серединах ячеек определяются уровень воды, температура, толщины льда и снега, а на границах ячеек — нормальные к ним компоненты скорости. В данных расчетах уровень дна также задавался в центрах ячеек (и считался постоянным во всей ячейке). При этом для уровня дна на границе между двумя ячейками выбиралось наибольшее значение.

ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ, ПОДГОТОВКА ВХОДНЫХ ДАННЫХ И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для расчетов термического и ледового режима Новосибирского водохранилища построена ортогонализированная криволинейная конечно-разностная сетка, содержащая 6195 ячеек (исключая постоянно неактивные ячейки, т. е. острова), а именно — до 396 ячеек вдоль русла Оби и до 43 ячеек в поперечном направлении (рис. 1). С понижением уровня воды в холодное время года часть ячеек осушалась и переставала быть активной. 65 границ между двумя соседними ячейками рассматривались как так называемые “Узкие дамбы” (“Thin dams”), т. е. переток воды через них был запрещен, так как там находились узкие острова, дамбы или косы. По вертикали водохранилище разбивалось на 15 слоев одинаковой относительной толщины.

Наиболее интенсивное течение в водохранилище имеет место на затопленном русле р. Оби [2]. При построении сетки в явном виде русло выделялось в речной части, а также частично и в озерной части водохранилища, насколько это не противоречило требованию ортогональности сетки и выделению границ между районами, для которых выполнялись расчеты качества воды. Сетка сгущалась в речной части водохранилища, особенно там, где затопленное русло было наиболее узким или резко поворачивало. Линейные

размеры ячеек менялись в диапазоне 150—1155 м, а соотношение длин их сторон было ≤ 2 .

Уровень дна в ячейке получался как среднее арифметическое попадающих в нее отметок уровня согласно цифровой модели рельефа ложа водохранилища (ЦМР), построенной в ИВЭП СО РАН. Основой для построения ЦМР была карта водного пути, уточненная и дополненная данными промерных работ, проведенных экспедиционными отрядами ИВЭП СО РАН в 2008—2010 гг. [8, 13] (рис. 1).

Выделение русла важно прежде всего потому, что к весне маловодного года (каким был и расчетный 1981 г.) в речной части водохранилища затопленные пойменные территории почти полностью осушаются, и оно редуцируется практически до этого русла.

В озерной части в силу относительной грубой сетки не всегда удавалось добиться соответствия ее линий затопленному руслу. Поэтому в некоторых случаях для предотвращения резкого изменения уровня дна вдоль этих линий он сглаживался.

В расчетах учитывался вклад рек Оби (гидрологический пост (гп) Камень-на-Оби), Берди (гп Старый Искитим), Коён (гп Нижний Коён), Каракан (гп Рождественка), Мильтюш (гп Улыбино), а также стока через плотину ГЭС [3, 5].

Расчет велся с 0 ч 1 ноября 1980 г. до 0 ч 1 января 1982 г. по астрономическому времени. Шаг по времени составлял 2 мин.

Для упрощения задания начальных условий и уменьшения влияния ошибки в их задании на ход расчета начальный момент выбирался так, чтобы водохранилище было полностью свободно ото льда, но дата была близка к дате начала ледостава, а поверхностная температура, соответственно, к температуре замерзания.

Расчет начинался с состояния покоя. Начальный уровень воды задавался постоянным по всей акватории и равным 112.23 м БС, что соответствует уровню в верхнем бьефе на 1 ноября 1980 г. Начальная температура воды также считалась

одинаковой по всему водохранилищу и равной 3.7°C, что примерно соответствует средневзвешенной поверхностной температуре на эту дату [4].

Использовались среднесуточные расходы притоков и стока через плотину ГЭС, а также среднедекадные значения температуры притоков [3, 5], которые присваивались серединам суток и декад соответственно.

В связи с малым количеством пунктов наблюдений для всего водохранилища использовались средневзвешенные значения данных 8-срочных наблюдений метеостанций (мс) Огурцово и Камень-на-Оби [1]. Однако скорость и направление ветра не усреднялись из-за неоднозначности такой процедуры для векторных величин. Вместо этого использовались их значения для мс Огурцово.

Гидрологические и метеорологические данные интерполировались линейно, за исключением скорости и направления ветра, которые считались кусочно-постоянными. В начальный момент времени расходы считались нулевыми.

В водном балансе водохранилища имеется существенная невязка [6]. Пробные расчеты показали значительное превышение расчетного уровня воды в верхнем бьефе по сравнению с наблюдаемыми. Можно предположить, что это вызвано, прежде всего, неточностью определения расхода р. Оби на гп Камень-на-Оби, особенно в половодье, когда речной поток сильно нестационарен и существенная часть воды идет по пойме. Поэтому применена специальная итерационная процедура для коррекции величин расхода р. Оби.

Сначала проводился расчет течения по плановому варианту модели (1 слой по глубине, без расчета температуры, осадки, испарение и лед не учитывались). Потом вычислялись скорости изменения объема водохранилища в предположении, что уровень воды везде равен соответственно наблюдаемым и расчетным уровням в верхнем бьефе (которые предварительно сглаживались, чтобы устранить высокочастотные колебания, связанные с ветровыми нагонами). Разница этих

скоростей и определяла искомую поправку на расход р. Оби, после чего вся процедура повторялась. После двух итераций расчетный уровень в верхнем бьефе стал практически неотличим от наблюдаемого, а уровень в районе Камня-на-Оби также стал близок к наблюдаемому (ошибка ≤ 0.4 м при годовом изменении уровня в 4.8 м). При расчете по полной модели уровень отличается не сильно (~10 см), так как испарение и осадки в значительной степени компенсируют друг друга [6].

Для расчетов качества воды результаты расчетов усредняются по 30 боксам, представляющим собой упомянутые выше 10 районов водохранилища, разделенных на 3 слоя по глубине. Из 10 районов 7 расположены по длине водохранилища вдоль его русла, 2 района расположены на мелководье у левого берега озерной части водохранилища и один — в Бердском заливе (рис. 1). Такое выделение районов в водохранилище объясняется сходством протекания там экологических процессов. Предполагается, что верхний и нижний слои имеют толщину 1 м, если глубина > 3 м (при наличии льда под глубиной понимается расстояние от его нижней границы до дна). При меньшей глубине толщина слоев одинакова.

Для каждого бокса рассчитывались его среднесуточные параметры, в частности, геометрические характеристики, температура воды и водообмен с другими боксами. Для этого каждая активная (не осушенная) ячейка расчетной сетки разбивалась по глубине на 3 слоя так, как описано выше. Температура воды в боксе получается усреднением по соответствующим слоям ячеек с учетом их объемов.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТОЛЩИНЫ ЛЬДА ЗИМОЙ 1980–1981 гг.

С начала расчета водохранилище охлаждается, и при переходе воды через точку замерзания начинает формироваться ледовый покров. В целом расчетная последовательность формирования ледового покрова для зимы 1980–1981 гг. соответствует порядку, реально наблюдавшемуся в другие годы [2]. Уже 3–6 ноября появляются забереги, прежде всего на левобережных мелководьях: на расположенном около входного ство-

ра Крутихинском мелководье, в районе пгт Ордынского, в отделенном островами Ирменском плесе в озерной части водохранилища, а также у устья р. Берди в Бердском заливе и в протоке за островом в районе с. Спирино (рис. 1).

К 7 ноября расчет показывает ледовые явления на большей части акватории водохранилища. Исключение составляют участки затопленного русла р. Оби в озерной части водохранилища примерно от с. Быстровка до плотины ГЭС в силу большой глубины и в речной части от входного створа до с. Усть-Алеус в силу относительно высокой температуры вод р. Оби. 8–9 ноября водохранилище от д. Ерестной до плотины в основном свободно ото льда, за исключением левобережных мелководий.

Затем ледовые поля в речной части водохранилища начинают продвигаться вдоль русла в сторону плотины, а в озерной – распространяются от левого берега на мелководье в центре приплотинного участка водохранилища. Появляется лед у аванпорта шлюза. К 17 ноября устанавливается устойчивый ледовый покров около места впадения р. Оби (к тому времени этот участок водохранилища из-за падения уровня воды редуцируется до бывшего русла реки); а к 18–19 ноября – и на всей акватории водохранилища, за исключением небольшой полыньи около плотины ГЭС, которая, по расчету, сохраняется вплоть до начала декабря.



Рис. 2. Расчетная толщина (м) льда на Новосибирском водохранилище 7 апреля 1981 г.

Если по аналогии с [34] считать началом ледостава дату установления устойчивого льда толщиной 3 см, то ошибка в его дате составляет ≤ 1 сут для всех гп (Соколово, Спирино, о. Дальний, Ордынское, Ерестная, Боровое, Сосновка, Верхний бьеф), за исключением гп Завьялово, где в расчете оно происходит на 6 дней позже, чем по данным наблюдений [6]. Это может быть объяснено тем, что наблюдения там могли производиться в устье р. Каракан, где ледостав начинался раньше. Таким образом, расчетная дата установления ледового покрова в среднем отличается от даты по данным наблюдений меньше чем на сутки.

Максимальная расчетная толщина льда зимой 1980–1981 гг. достигается в первой декаде апреля. В большинстве случаев она составляет 60–80 см (рис. 2). Наибольшая толщина (80 см) в речной части достигается в районе Камня-на-Оби, а в озерной – в глубоководных районах у правого берега и плотины ГЭС (до 73 см). Здесь ледовый покров устанавливается позже всего; следовательно, толщина термоизолирующего снежного покрова наименьшая. Наименьшая расчетная толщина льда (< 60 см) получена в относительно мелководном районе в центре приплотинного участка водохранилища.

В целом толщина льда в данном расчете была занижена особенно в озерной части водохранилища, что может быть частично объяснено локальными особенностями мест измерений, не передаваемыми в масштабе модели, и использованием усредненных по пространству начальных данных и метеоданных, в том числе интенсивности осадков.

Максимальная расчетная толщина льда у берега вблизи гидрологических постов в среднем на 17% меньше измеренной. Среднеквадратичное отклонение в этом случае составляет 19%. Если же сравнивать расчетную толщину льда с имеющимися для нескольких дат измеренными величинами по ледовым профилям (пгт Ордынское – с. Нижнекаменка, с. Береговое – с. Быстровка, с. Ленинское – п. Сосновка, Верхний бьеф) то среднеарифметическое отклонение составляет 8%, а среднеквадратичное – 18% от средней измеренной толщины.

Расчетный порядок освобождения водохранилища ото льда также в основном соответствует описанному в литературе [2], т. е. освобождение происходит вдоль течения Оби и Берди, причем в речной части — прежде всего вдоль затопленного русла. В конце первой декады апреля начинается половодье, и речная часть водохранилища выходит за пределы старого русла. Быстро затапливается Крутихинское мелководье, и постепенно начинают затапливаться мелководья на левобережье, в центре озерной части и в Бердском заливе.

К 22 апреля водохранилище очищается ото льда в районе сел Соколово и Спирино. К 23 апреля — в районе пгт Ордынское, д. Ерестная, о. Дальний, с. Завьялово и устья р. Берди. К 24–25 апреля ото льда очищается протока у с. Боровое, Бердский залив и озерная часть водохранилища, за исключением прилегающего к плотине района и района п. Сосновка, где это происходит 26–27 апреля. Согласно [6], очищение ото льда действительно позднее всего происходит именно у пп Сосновка.

Для гидрологических постов верхней части водохранилища — Соколово, Спирино, Ордынское — по расчету, очищение ото льда происходит на 2–3 дня позже, чем указано в ежегоднике [6]. Для расположенных в озерной части постов Боровое и Сосновка — на 5–6 дней раньше, но все равно позже указанных там дат окончания ледостава. Для постов Ерестная, о. Дальний, Завьялово и Верхний бьеф отклонение составляет 1 день. Кроме того, сложно однозначно выделить расчетное время очищения водохранилища ото льда вблизи того или иного гидрологического поста. Приведенные даты относятся к глубоким местам, но на осушенных и вновь затапливаемых отмелях лед может, согласно расчету, сохраняться и в первую декаду мая. Средние даты очищения водохранилища ото льда по данным расчета и наблюдений совпадают.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОДЫ В БЕЗЛЕДНЫЙ ПЕРИОД 1981 г.

Расчетное распределение температуры по акватории водохранилища носит сложный характер, обусловленный распространением речной

воды с медленно меняющейся температурой вдоль русел рек Оби и Берди, быстрым нагревом и быстрым охлаждением воды на левобережных мелководьях (прежде всего на Крутихинском мелководье, в окрестностях Ирменского плеса и в меньшей степени в районах с. Кирза — пгт Ордынское и с. Боровое) при изменении погоды и даже времени суток, а также переносом этих тепловых пятен в глубоководные районы озерной части водохранилища, где температура воды меняется медленнее всего.

В целом, выполняется приведенный в [2, 10] порядок изменения температуры воды в водохранилище.

В начале весны вода на мелководьях холоднее, чем в русле реки, и тепло от г. Камень-на-Оби к плотине распространяется быстрее у правого берега.

На приплотинном участке (между п. Сосновка и плотиной ГЭС) тепло быстрее распространяется в центре водохранилища, в то время как в глубоководном районе у правого берега сохраняется зона пониженной температуры. К началу мая она исчезает, и далее распространение тепла на этом участке водохранилища зависит от метеорологических условий: при похолодании и северном ветре теплая вода там распространяется ближе к левому и правому берегам, обтекая расположенную в центре отмель.

Уже к началу июня порядок меняется и с прогревом мелководий в озерной части водохранилища температура у левого берега, как правило, выше, чем у правого.

Расчет не показывает существенной стратификации для начала весеннего прогрева. Небольшая обратная стратификация локально образуется при ночном охлаждении ранее прогретой воды. Но к началу июня поверхностная температура в озерной части водохранилища уже заметно выше, чем придонная. К середине июня разница между ними в районе рейдовой вертикали № 4 (упомянутый глубоководный район у правого берега между п. Сосновка и Бердским заливом) (рис. 1) достигает $\sim 6^{\circ}\text{C}$, что соответствует максимальной разности, наблюдавшейся на этой вертикали в июне [6] (рис. 3). Преиму-

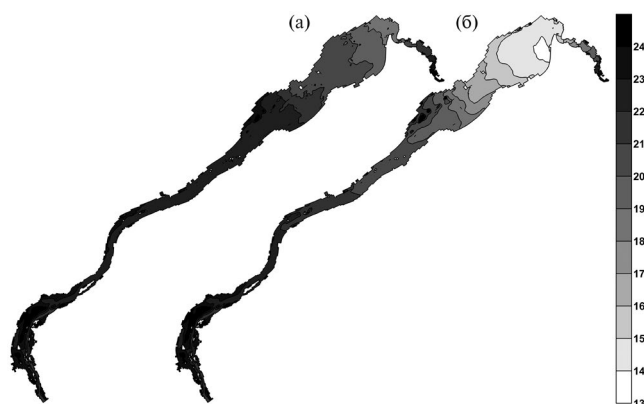


Рис. 3. Поверхностная (а) и придонная (б) расчетная температура воды Новосибирского водохранилища в полдень 14 июня 1981 г. (°C).

щественно по ночам в этом месте при глубине ~14 м образуется верхний перемешанный слой толщиной в среднем 2–3 м. Со временем стратификация уменьшается и толщина этого слоя увеличивается вплоть до гомотермии.

Наибольшее число измерений температуры воды на различных глубинах имеется для рейдовой вертикали № 14, расположенной непосредственно у плотины ГЭС. Соответствующие графики для моментов наибольшей стратифи-

кации приведены на рис. 4. Видно, что в июне есть некоторое отклонение результатов расчета от натуральных данных, что может быть связано как с особенностями вертикального распределения величин стока через плотину ГЭС в силу близкого расстояния от нее, не соответствующего масштабу модели, так и с искусственным перемешиванием в σ -координатах.

В середине июня разница между расчетными значениями поверхностной температуры в речной части водохранилища (в районе с. Спирино) и около плотины ГЭС составляет 7°C.

Затем продвижение тепла к плотине становится более равномерным по ширине водоема.

В середине последней декады месяца в районе Ирменского плеса и около пгт Ордынского по всей ширине водохранилища имеются обширные зоны с температурой воды ~25°C, в то время как в районе плотины она составляет ~20°C. При этом небольшая стратификация заметна даже в речной части водохранилища.

В конце июня – начале июля происходит похолодание и относительная монотонность изменения температуры воды во времени и по

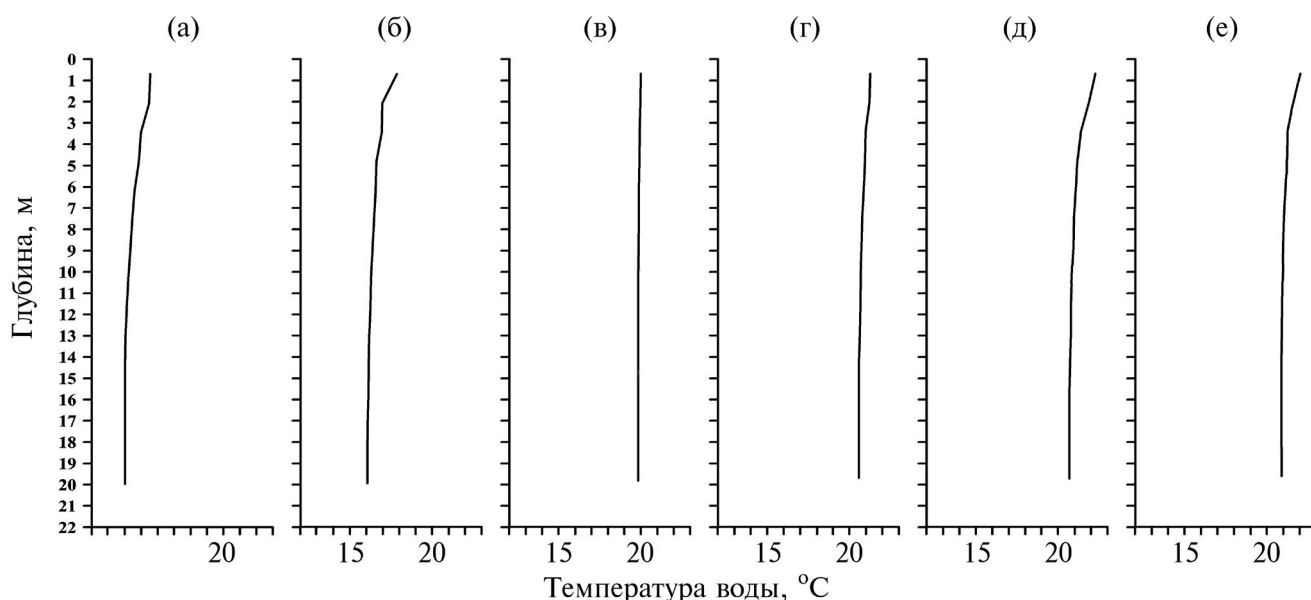


Рис. 4. Вертикальное распределение расчетной (сплошная линия) и измеренной (точки) температуры воды на рейдовой вертикали № 14 (у плотины ГЭС) Новосибирского водохранилища для моментов наибольшей стратификации по данным измерений. а – 10 июня, б – 19 июня, в – 1 июля, г – 20 июля, д – 10 августа, е – 20 августа.

длине водохранилища нарушается. В июле и августе температура поверхности воды на большей части акватории составляет 19–24°C, различается по пространству не более чем на 2–3°C. В некоторые моменты температура в отдельных точках мелководий со слабым водообменом (в основном на Крутихинском мелководье, где она меняется быстрее всего в силу очень малой глубины) >30°C или <17°C. Разность поверхностной и придонной температуры в озерной части водохранилища также ≤2°C либо вовсе отсутствует.

Летом 1981 г. было два длительных похолодания: в конце июня — начале июля и в конце июля — начале августа, когда температура на левобережных мелководьях и в речной части водохранилища была ниже, чем в озерной части. Причем в первом случае приплотинный участок еще недостаточно прогрелся, поэтому отмечался явно выраженный “остров” тепла у правого берега примерно от о. Дальнего до п. Сосновка.

С конца августа начинается осеннее охлаждение, мелководья охлаждаются быстрее русла и, тем более, — глубоководных районов озерной части. Поэтому температура от г. Камень-на-Оби к плотине быстрее уменьшается вдоль левого берега. В отличие от весеннего прогрева, в осеннем охлаждении мелководья играют большую роль, чем р. Обь и другие притоки, поэтому температура по длине водохранилища уменьшается не монотонно, и ее поперечный градиент более выражен.

В первой декаде октября на мелководьях, а в третьей — и на основной акватории водохранилища имеет место обратная стратификация, причем первоначально она сочетается с небольшой прямой стратификацией на приплотинном участке, который охлаждается последним. Поверхностная, а затем и придонная температура на этом участке, по результатам расчета, достигает точки замерзания в начале декабря и далее не повышаются. В действительности в декабре—январе в этом районе зафиксирована придонная температура 1–1.5°C [6]. Это может быть объяснено, в том числе, отсутствием учета теплообмена с дном. Действительно, в [2] отмечено, что начало ледостава происходит в условиях, близких к

гомотермии, но затем начинается прогрев придонных слоев воды за счет отдачи тепла грунтом.

Как и следовало ожидать, влияние р. Берди на термический режим водохранилища носит локальный и не всегда выраженный характер, распространяясь вдоль правого берега до плотины, незначительно увеличивая там температуру воды весной и в начале лета и уменьшая ее осенью. В июле—сентябре в средней части Бердского залива имеет место существенное локальное понижение температуры за счет поступления холодной воды р. Коён. Влияние других учитывавшихся притоков на термический режим водохранилища менее заметно.

Расчетная температура воды была сопоставлена с данными наблюдений на всех гидрологических постах и рейдовых вертикалях [6]. Сравнение со среднедекадными данными гидрологических постов проводилось для всех декад с апреля по ноябрь включительно, для чего расчетные значения поверхностной температуры также усреднялись подекадно. Распределение температуры по глубине (0.1, 2, 5, 10, 15 м и у дна) в [6] дано для рейдовых вертикалей № 10, 6, 4, 14, находящихся на затопленном русле реки или около него соответственно в районах пгт Ордынского, с. Быстровка, п. Сосновка и плотины ГЭС (рис. 1). Для первых трех вертикалей наблюдения проводились в конце или второй половине практически каждого месяца, а для последней — в конце каждой декады. В этом случае сравнение проводилось с конца мая по конец октября.

Для рейдовых вертикалей средняя расчетная температура на 0.1°C меньше измеренной, а среднеквадратичное отклонение составляет 1.05°C. Если сравнивать усредненные по глубине значения (причем для усреднения измеренных значений температуры используется измеренная глубина), то средняя расчетная температура будет на 0.19°C меньше измеренной, а среднеквадратичное отклонение составит 0.71°C.

Как правило, весной и осенью расчетная температура меньше, а летом — больше измеренной. Это может быть объяснено как отсутствием учета теплообмена с дном, так и недостаточно хорошей передачей температурной стратификации.

Для гидрологических постов средняя расчетная температура на 0.18°C меньше измеренной, а среднеквадратичное отклонение составляет 0.84°C . В данном случае ошибка может быть связана также со сравнительно грубой дискретизацией расчетной области, что наиболее заметно в прибрежных районах. Причем явной закономерности в изменении знака ошибки со временем не наблюдается. В целом ошибка для речной части меньше, чем для озерной, так как в речной части точнее отслеживается затопленное русло р. Оби, поэтому дискретизация там менее грубая.

Несоответствие расчетной температуры измеренной также может быть вызвано ошибками в расчете времени очищения ото льда, неправильной оценкой расхода р. Оби и усреднением метеоданных по акватории.

РЕЗУЛЬТАТЫ УСРЕДНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО БОКСАМ

На рис. 5 даны графики годового хода расчетной среднесуточной температуры воды для поверхностных боксов некоторых районов водохранилища (рис. 1). Все графики ведут себя в соответствии с описанием, данным в предыдущем разделе.

Вода нагревается в апреле–июне и охлаждается с конца августа по начало ноября для речной части водохранилища или начало декабря для

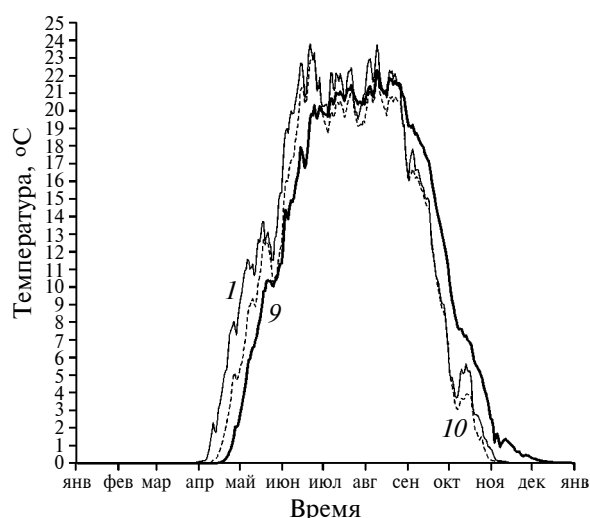


Рис. 5. Расчетная температура воды Новосибирского водохранилища для поверхностных боксов районов 1 (1), 9 (9) и 10 (10) за 1981 г.

озерной. В июле–августе поверхностная температура колеблется в пределах $19\text{--}24^{\circ}\text{C}$ (в среднем $21\text{--}22^{\circ}\text{C}$), причем в приплотинной части (районы 7, 8, 9) ее значения и амплитуда колебаний меньше, чем в районах, расположенных ближе к устью р. Оби, а максимум достигается в августе. В районах 2, 3, 4, 6, 10 максимум поверхностной температуры достигается во второй половине июня, а в районах 1 и 5 июньский и августовский пики примерно равнозначны.

Чем выше по течению р. Оби находится район, тем раньше он нагревается весной (разница поверхностной температуры районов 1 и 9, расположенных около входного створа и плотины соответственно, может достигать 6.5°C) и охлаждается осенью. Мелководный район 5, большей частью расположенный за Новопичуговскими и Боровскими островами и включающий Ирменский плес, в апреле–мае нагревается медленнее, чем расположенный рядом глубоководный район 6 (разница поверхностной температуры может достигать $2\text{--}3^{\circ}\text{C}$), а позже — быстрее. Осенью он также охлаждается быстрее. Разница в поверхностной температуре между расположенными ближе к плотине районами — мелководным 7-м и глубоководным 8-м — менее выражена в силу разной морфологии районов 5 и 7 и близости последнего к плотине. Термический режим Бердского залива, т. е. района 10, близок к речной части водохранилища, но в июле–августе он холоднее приплотинной части на $\sim 1^{\circ}\text{C}$.

По расчетам, заметная прямая стратификация в озерной части водохранилища имеет место с мая по начало сентября, достигая наибольшего значения в июне, а обратная — в конце октября — в ноябре. Средний бокс обычно ближе по температуре к придонному, чем к поверхностному, причем температура в первых двух меняется гораздо медленнее, чем в третьем. Наибольшая стратификация отмечена в глубоководном районе 8, где находится гидрологический пост Сосновка и рейдовая вертикаль 4. Разность температуры поверхностного и придонного боксов там достигает $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ в мае, 4.5°C в июне, до 2°C в июле–августе и $-1.5\text{--}-2^{\circ}\text{C}$ в ноябре (рис. 6).

С удалением района от района 8 стратификация уменьшается, особенно в период весенне-

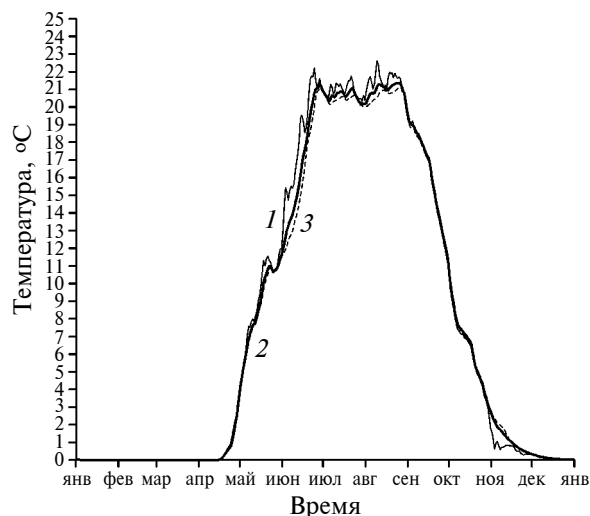


Рис. 6. Расчетная температура воды Новосибирского водохранилища для поверхностного (1), среднего (2) и придонного (3) боксов района 8 за 1981 г.

летнего прогрева. Существенной стратификации в мае в других районах не наблюдается. В июне разность температуры поверхностного и придонного боксов достигает соответственно 3.5, 2.5 и 1.5°C в районах 9 (у плотины ГЭС), 6 и 10 (Бердский залив). В речной части водохранилища эта разность еще меньше: ~1 и <1°C в районах 4 и 3. Июньская стратификация там не превышает июльскую и августовскую, что понятно, так как в начале лета в речной части половодье способствует перемешиванию. Район 2 практически полностью перемешан по вертикали в течение всего года.

Отмеченные термические эффекты стали существенными факторами формирования качества воды в исследуемом объекте [31–33].

Необычная ситуация наблюдается в самом верхнем районе 1, большую часть которого составляет Крутихинское мелководье. Температура поверхностного и придонного боксов там практически одинакова, но температура среднего бокса может быть меньше при прогреве и больше при охлаждении, причем в период осеннего охлаждения разность может достигать 0.5–1°C. Это связано со способом разбиения на боксы по вертикали. Для поверхностного и придонного боксов удельный вес мелководий значительно больше, чем для среднего. В значительно мень-

шей степени этот эффект наблюдается в районе 10 и других районах, преимущественно в апреле и сентябре–октябре.

Разницы температуры поверхностного и придонного боксов в равноудаленных от плотины районах 7 и 8 примерно одинаковы (с точностью до 0.5°C), так как граница между ними не точно отражает деление водохранилища на глубоководную акваторию и мелководье, оба района имеют как глубокие, так и мелкие зоны. В мелководном районе 5, содержащем Ирменский плес, это разность все же несколько (до 0.5–1°C) меньше, чем в соседнем глубоководном районе 6, при этом разность температур среднего и придонного боксов заметно меньше, чем в районе 6.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показано выше, модель в основном адекватно описывает изменение распределения температуры воды и толщины льда в Новосибирском водохранилище в годовом цикле. Результаты расчета в целом качественно соответствуют описанию термического режима этого водохранилища для характерного года [2, 10] и количественно соответствуют данным наблюдений за 1980–1981 гг. [6].

Полученные результаты могут быть использованы для моделирования водной экосистемы и тем самым помочь выявить закономерности изменения важных параметров качества воды, таких как, например, концентрация растворенного кислорода. В дальнейшем предлагаемая модель может служить основой для выработки рекомендаций по оптимизации использования водных ресурсов водохранилища и управлению режимом его наполнения и сброса для обеспечения устойчивого водоснабжения и предотвращения неблагоприятных экологических ситуаций.

Авторы выражают благодарность А.Т. Зиновьеву (ИВЭП СО РАН) — за ценные советы, К.В. Марусину (ИВЭП СО РАН) — за предоставленную цифровую модель рельефа ложа водохранилища, Эрику де Года (Erik de Goede) (Дельта-реэ (Deltaree)) — за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Веселов В.М., Прибыльская И.Р.* Специализированный архив метеоданных для климатических исследований. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2019. [Электронный ресурс]. <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 09.09.2019)
2. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Новосибирское водохранилище и озера бассейна Средней Оби / Под ред. *В.А. Знаменского, М.Я. Кунявского*. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 156 с.
3. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1980 г. Ч. 1. Реки и каналы. Т. 6. Бассейн Карского моря (западная часть). Вып. 0–3. Река Обь и ее бассейн до устья р. Иртыш. Новосибирск: ЗСУГМС, 1982. 536 с.
4. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1980 г. Ч. 2. Озера и водохранилища. Т. 6. Бассейн Карского моря (западная часть). Вып. 0–3. Река Обь и ее бассейн до устья р. Иртыша. Новосибирск: ЗСУГМС, 1982. 109 с.
5. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1981 г. Ч. 1. Реки и каналы. Т. 1. Вып. 10. Бассейны Оби (без бассейна Иртыша), Надыма, Пура, Таза. Новосибирск: ЗСУГМС, 1984. 540 с.
6. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. 1981 г. Ч. 2. Озера и водохранилища. Т. 1. Вып. 10. Бассейн Карского моря. Новосибирск: ЗСУГМС, 1983. 97 с.
7. *Зиновьев А.Т., Кошелев К.Б., Марусин К.В.* Влияние Новосибирского водохранилища на уровни воды реки Оби в период весеннего половодья (территория города Камень-на-Оби) // *Вод. хоз-во России: проблемы, технологии, управление*. 2020. № 4. С. 6–18.
8. Карта Новосибирского водохранилища. Новосибирск: Обское гос. бассейновое упр. вод. путей и судоходства, 2007.
9. *Квон В.И., Квон Д.В., Зонов С.Д., Карамышев В.Б., Филатова Т.Н.* Численный расчет сезонных изменений термической структуры в равнинных водохранилищах // *Совместный вып. журн. “Вычислительные технологии” и журн. “Региональный вестник Востока”*. По материалам международ. конф. “Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании”. 2003. Ч. 4. С. 277–282.
10. Комплексные исследования Новосибирского водохранилища / Под ред. *Ю.И. Подлипского, Т.С. Чайковской*. М.: Гидрометеиздат, 1985. 134 с.
11. Многолетняя динамика водно-экологического режима Новосибирского водохранилища / Отв. ред. *О.Ф. Васильев*. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. 393 с.
12. *Савкин В.М., Двуреченская С.Я., Орлова Г.А., Булычева Т.М.* Формирование гидролого-гидрохимического режима верхней Оби на участке Новосибирского водохранилища в условиях изменения природно-техногенной ситуации // *Сиб. экол. журн.* 2003. Т. 10. № 2. С. 171–179.
13. *Федорова Е.А.* Особенности осадконакопления в котловинах водохранилищ равнинного и предгорного типа на примере Новосибирского и Красноярского водохранилищ. Дис. ... канд. геогр. наук. М.: МГУ, 2016. 178 с.
14. *Филатов Н.Н.* Разработка новых моделей термогидродинамики и экосистемы Ладожского озера // *Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях изменяющегося климата* / Под ред. *С.А. Кондратьева*. М.: РАН, 2021. С. 491–493.
15. *Филатов Н.Н., Исаев А.В., Савчук О.П.* Оценка состояния и прогнозирование изменений гидрологического режима и экосистем крупных озер // *Тр. КарНЦ РАН*. 2019. № 3. С. 99–113.
16. *Davies A.M., Gerritsen H.* An intercomparison of three-dimensional tidal hydrodynamic models of the Irish Sea // *Tellus A*. V. 46. № 2. P. 200–221.
17. Delft3D-FLOW. User Manual. Version 4.05. Delft: Deltares, 2023. 701 p. [Электронный ресурс]. https://content.oss.deltares.nl/delft3d4/Delft3D-FLOW_User_Manual.pdf (дата обращения: 17.05.2023)
18. *Gill A.E.* Atmosphere-ocean dynamics. New York: Acad. Press, 1982. 652 p.
19. *Goede E.D. de, Graaff R.F. de, Wagner T., Sheets B.* Modelling of ice growth and transport on a regional scale, with application to Fountain Lake // *Proc. 33rd Int. Conf. Offshore Mechanics Arctic Engineering*. San Francisco: Am. Soc. Mechanical Engineers, 2014. V. 45561. P. V010T07A037.
20. *Graaff R.F. de, Lindfors A., Rasmus K., Morelissen R.* Modelling of a Thermal Discharge in an Ice-covered Estuary in Finland // *Proc. OTC Arctic Technol. Conf.* Copenhagen: OTC, 2015. P. OTC–25521.
21. *Hunke E.C., Dukowicz J.K.* An elastic-viscous-plastic

- model for sea ice dynamics // J. Physi. Oceanogr. 1997. P. 849–1867.
22. *Koshelev K.B., Goede E.D. de, Zinoviev A.T., Graaff R.F. de.* Modelling of thermal stratification and ice dynamics with application to Lake Teletskoye, Altai Republic, Russia // Water Resour. 2021. V. 48. № 3. P. 368–377.
 23. *Kravtchenko V.V.* A 2D numerical model of Novosibirsk reservoir flows using a mixed finite element method // Bull. Novosibirsk Computing Center. Ser. Numerical modeling in atmosphere, ocean, and environment studies. 2016. № 19. P. 11–16.
 24. *Kravtchenko V.V., Golubeva E.N., Tskhai A.A., Tarhanova M.A., Kraineva M.V., Platov G.A.* The Novosibirsk reservoir hydrothermal regime model // Bull. Novosibirsk Computing Center. Seri. Numerical modeling in atmosphere, ocean, and environment studies. 2019. № 17. P. 31–50.
 25. *Leendertse J.J.* Aspects of a computational model for long-period water-wave propagation. Santa Monica: RAND, 1967. 187 p.
 26. *Lietaer O., Fichet T., Legat V.* The effects of resolving the Canadian Arctic Archipelago in a finite element sea ice model // Ocean Modelling. 2008. P. 140–152.
 27. *Millero F.J., Poisson A.* International one atmosphere equation of state of seawater // UNESCO technical papers in marine science. 1981. V. 38. P. 13–18.
 28. *Rayan P.J., Harleman D.R.F., Stolzenbach K.D.* Surface heat loss from cooling ponds. // Water Resour. Res. 1974. V. 10. № 5. P. 930–938.
 29. *Semtner A.J.Jr.* Numerical simulation of the Arctic Ocean circulation // J. Phys. Oceanogr. 1976. P. 409–424.
 30. *Stelling G.S., Leendertse J.J.* Approximation of convective processes by cyclic AOI methods // Estuarine and coastal modeling. Proc. 2nd Conf. Estuarine Coastal Modelling. Tampa: ASCE, 1992. P. 771–782.
 31. *Tskhai A.A., Ageikov V.Yu.* Spatiotemporal Model of the Ecosystem of the Novosibirsk Reservoir // Geogr. Natural Resour. 2022. V. 43. Suppl. 1. P. S85–S91.
 32. *Tskhai A.A., Ageikov V.Yu., Semchukov A.N.* Ecohydrological mechanism of phytoplankton distribution in the water body // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. V. 866. Proc. 3rd Int. Sci. Conf. “Sustainable and Efficient Use of Energy, Water and Natural Resources”. St. Petersburg, 2021. [Электронный ресурс]. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/866/1/012040/pdf> (дата обращения: 20.09.2023)
 33. *Tskhai A.A., Ageikov V.Yu., Semchukov A.N.* Modeling of the spatial distribution of the components for the ecosystem of the Novosibirsk reservoir // Proc. All-Russian Conf. Int. Participation “Spatial data processing for monitoring of natural and anthropogenic processes” (SDM–2021). Novosibirsk, 2021. P. 557–566. [Электронный ресурс]. http://ceur-ws.org/Vol-3006/66_regular_paper.pdf (дата обращения: 20.09.2023)
 34. *Wake A., Rumer R.R.* Modeling ice regime of Lake Erie // J. Hydraulics Division. 1979. V. 105. № 7. P. 827–844.
 35. *Zhang Y.J., Wu C., Anderson J., Danilov S., Wang Q., Liu Y., Wang Q.* Lake ice simulation using a 3D unstructured grid model // Ocean Dynamics. 2023. V. 73. P. 219–230.