

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ИВАНЬКОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Г.А. Саминский

Институт водных проблем РАН
ул. Губкина, 3, Москва, Россия, 119333

Численное трехмерное моделирование Иваньковского водохранилища позволяет оценить влияние теплового сброса Конаковской ГРЭС. Модель также использована для изучения термической структуры водохранилища при экстремально жарких метеорологических условиях.

Ключевые слова: термогидродинамика, моделирование.

Настоящая работа посвящена численному трехмерному моделированию термического и гидродинамического режимов в Иваньковском водохранилище. Важнейшей его особенностью является прием подогретых вод с Конаковской ГРЭС, влияние которой на термическую и гидродинамическую структуру водохранилища представляет особый интерес.

Иваньковское водохранилище (рис. 1) расположено на границе Московской и Тверской областей. Оно является водохранилищем комплексного использования. Водоем относится к водохранилищам долинного типа и является крупным по своим геометрическим параметрам. Основные морфометрические характеристики водоема при НПУ (124,00 м БС) следующие: площадь водной поверхности — 327 км²; объем — 1,12 км³, полезный объем — 0,813 км³, резервный объем — 0,070 км³; средняя глубина — 3,4 м, наибольшая глубина — 19 м; наибольшая ширина — 8 км. Водохранилище довольно мелководно: более 48% всей его площади занимают глубины от 0 до 2 м [1].

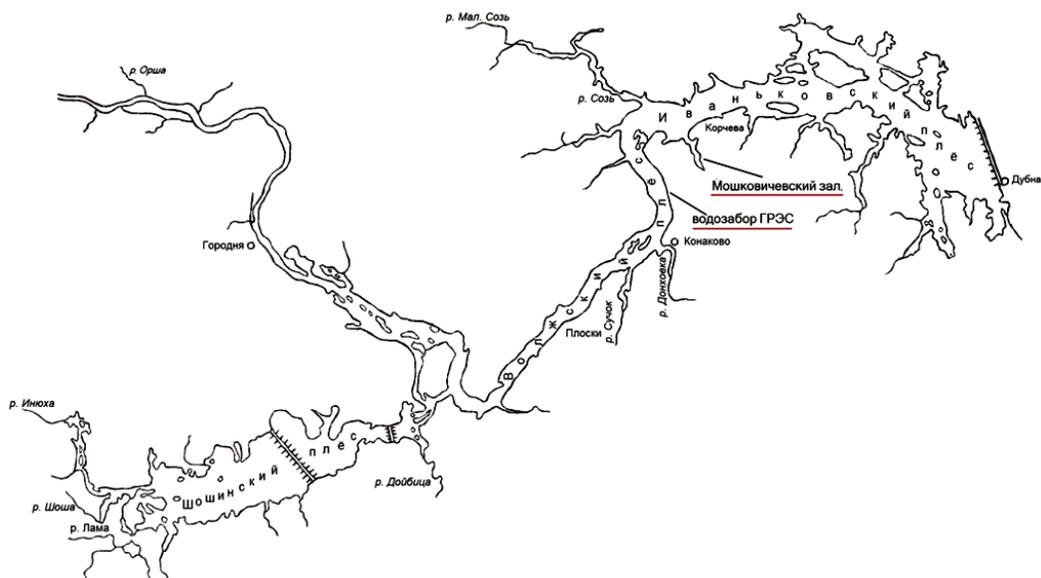


Рис. 1. Схема Иваньковского водохранилища; положение водозабора Конаковской ГРЭС и Мошковичевского залива

Особенности современного термического и гидродинамического водохранилища представляют собой как научный, так и практический интерес. В условиях глобального изменения климата и интенсивного развития Московского региона важной задачей является определение термического режима водохранилища при экстремально жарких метеорологических условиях и увеличенном тепловом сбросе с Конаковской ГРЭС.

Для решения поставленных задач использовалась Глобальная эстуарийная модель переноса (General Estuarine Transport Model — GETM). GETM — трехмерная численная модель для описания наиболее важных термодинамических и гидродинамических процессов в природных водах [2]. Для расчетов с использованием данной модели необходимо иметь данные о глубинах водного объекта в узлах регулярной сетки, метеоданные (температура воздуха, температура точки росы, давление, общая облачность, скорость и направление ветра), данные о расходах источников (если они есть).

Для построения численной модели Ивановского водохранилища в летние месяцы 2010 и 2011 гг. проводились натурные измерения глубины, температуры поверхности воды, объемов сброса и температуры сбросных вод с ГРЭС. Всего было выполнено 7197 измерений глубины и температуры воды в Ивановском и Волжском плесах водохранилища. Кроме того, использовались данные метеонаблюдений на м/с г. Тверь. Температура сбросной воды превышает температуру заборной воды на 8 °С.

Валидация модели проводилась по данным измерений температуры поверхности воды в различные дни полевых сезонов 2010 и 2011 гг. Примеры распределения измеренной температуры воды и сравнение с рассчитанными температурами воды приведены на рис 2.

В результате измерений 2 сентября 2010 г. получена карта распределения поверхностной температуры воды $t_{в.пов}$ (рис. 2а). Оно характеризуется температурным диапазоном от 15,5 до 16 °С в южной половине участка и от 16, до 16,5 °С в северной половине участка измерений.

Анализ карты разности измеренной и рассчитанной поверхностной температуры воды (рис. 2 в) показывает, что почти на всей территории участка различия составляют менее 0,5 °С, что является хорошим показателем сходимости.

Измерения $t_{в.пов}$ 7 сентября 2010 г. (рис. 2 б) показали равномерное распределение поверхностной температуры по всему участку. Температура воды на большей части участка составляет 13,8—14 °С. На фоне такой гомотермии особенно выделяется повышение температуры воды у левого берега в середине участка. Здесь температура воды нагрета до 14,8 °С. Очевидно, такое положение дел связано с тепловым сбросом небольшого объема в этой части Ивановского водохранилища. При расчетах этот источник тепла не учитывался. Вследствие этого схема разницы рассчитанных и измеренных температур (рис. 2 г) показывает отклонения от 0 до 0,4 °С на всей площади участка, и лишь в месте поступления вод неизвестного источника тепла разность измеренных и расчетных температур достигает 1 °С. Небольшое значение $t_{в.пов} - t_{п.расч}$ на всем участке говорит об успешном моделировании для этого участка, а относительно большая разность в месте сброса не свидетельствует против модели.

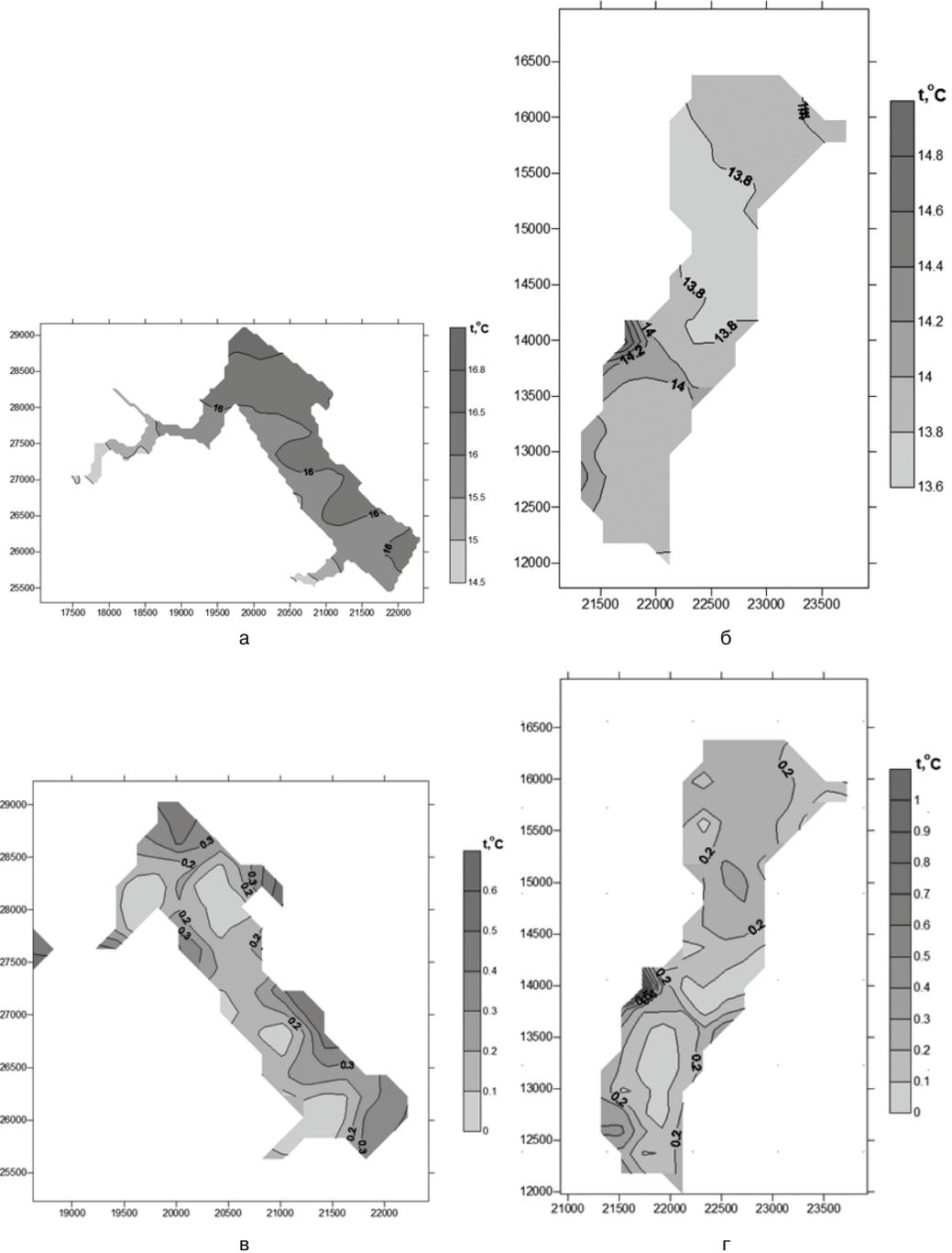


Рис. 2. Распределение температуры поверхности воды в Ивановском водохранилище на примере результатов измерений 2 и 7 сентября (а, б) и абсолютная разница между измеренными и рассчитанными температурами поверхности воды в эти дни (в, г соответственно)

Аналогичные характеристики разницы измеренной и рассчитанной температурой поверхности водохранилища наблюдаются и для других участков водохранилища, на которых измерения проводились в другие дни.

Полученные статистические характеристики также подтверждают успешность моделирования Иваньковского водохранилища. Среднеквадратическая ошибка моделирования при использовании всех данных наблюдений и вычислений составляет $m = 0,65$ °С. Средняя измеренная температура воды за период измерений $\bar{t}_и = 15,04$ °С. Относительная средняя квадратичная ошибка составляет $\delta = 0,043$ или 4,3%. Такой результат показывает удовлетворительную точность моделирования в целом.

Чтобы показать успешность применения трехмерной численной модели к Иваньковскому водохранилищу, использовались также распределения температуры воды и скорости течения по глубине. Были использованы данные измерений температуры и скорости на разных глубинах, выполненные в 1981 г. в рамках работы гидрологического отряда Иваньковской экспедиции 1981 г. сотрудниками Института водных проблем АН СССР.

Для верификации модели Иваньковского водохранилища проводилось моделирование с использованием данных срочных наблюдений по м/с г. Тверь за 1981 г. Примеры расчетов и измерений температуры воды и скорости течения на разных глубинах представлены на рис. 3, 4, где сравниваются соответствующие величины, измеренные у д. Городня и у д. Плоски (см. рис. 1).

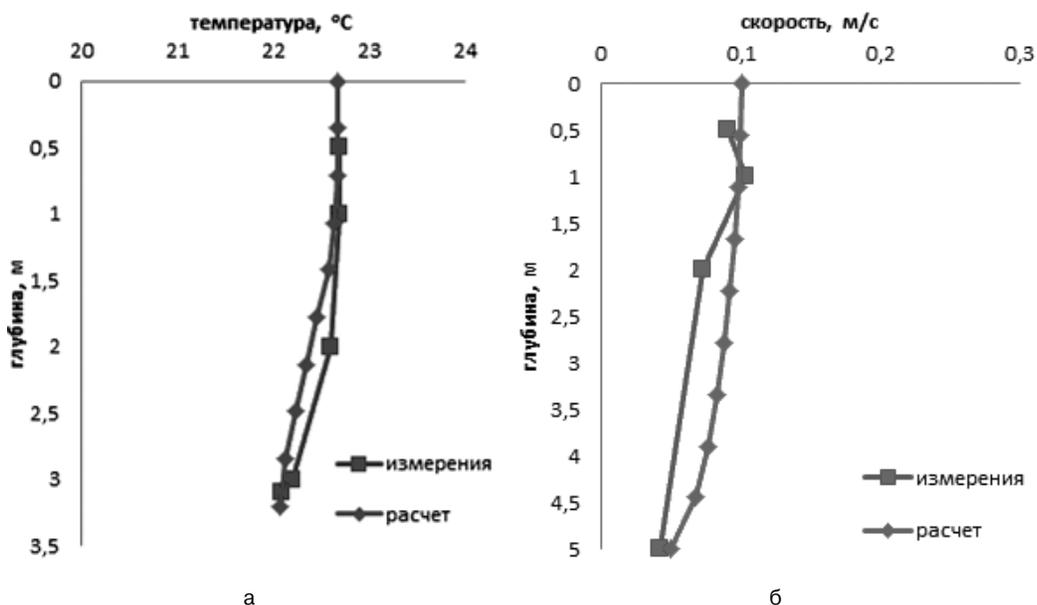


Рис. 3. Сравнение результатов измерений температуры воды (а) и скорости течений (б) по измерениям у д. Городня 16 июля 1981 г. и результатов расчета в модели GETM

Сравнение результатов моделирования и результатов измерений (рис. 3, 4) показывают хорошее совпадение результатов измерений и результатов моделирования. Статистический анализ достоверности моделирования невозможен, так как количество измерений слишком мало. Практика гидрологических расчетов указывает, что количество измерений должно быть не менее 25, что не удовлетворяется ни в одном случае.

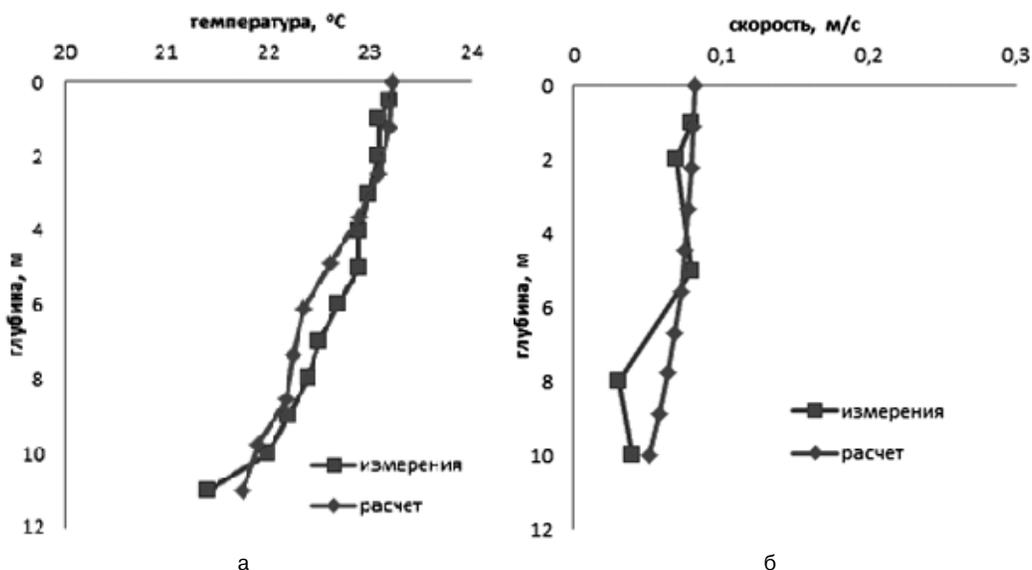


Рис. 4. Сравнение результатов измерений температуры воды (а) и скорости течений (б) у д. Плоски 20 июля 1981 года и результатов расчета в модели GETM

Тем не менее расчет среднеквадратической ошибки между рассчитанными и измеренными температурами воды по всем температурным вертикалям составляет 0,3 °С, что свидетельствует об удовлетворительных результатах моделирования. Среднеквадратическая ошибка между измеренными и рассчитанными для разных вертикалей скоростями составляет 1,8 см/с, что меньше точности измерений. Таким образом, статистический анализ показывает удовлетворительную точность моделирования динамической и термической структуры Иваньковского водохранилища.

Визуальный анализ рассчитанных и измеренных эпюр для всех участков Иваньковского водохранилища также показывает удовлетворительное описание вертикального распределения температуры воды и скорости течения с помощью модели GETM.

Сравнение данных измерений температуры поверхности водохранилища и данных расчетов показывает удовлетворительную точность моделирования. Сравнение распределения температуры воды и скорости течения на различных вертикалях по данным измерений и по данным расчетов также показывает хорошее совпадение. Все это свидетельствует об успешном численном моделировании трехмерной термогидродинамической структуры Иваньковского водохранилища.

Моделирование Иваньковского водохранилища с использованием реальной погоды лета 2011 г. и среднемноголетнего притока воды в водохранилище показало, что в целом температура поверхности водохранилища имеет общую тенденцию к равномерному увеличению температуры воды от верховьев водохранилища к приплотинной его части (рис. 5). На этом фоне особенно ярко выделяется область, прилегающая к устью Мошковичевского залива. Влияние подогретых вод Мошковичевского залива распространяется в радиусе 1 км от его устья. Температура в зоне влияния в среднем на 2 °С выше, чем в той части водохранилища, где это влияние незаметно.

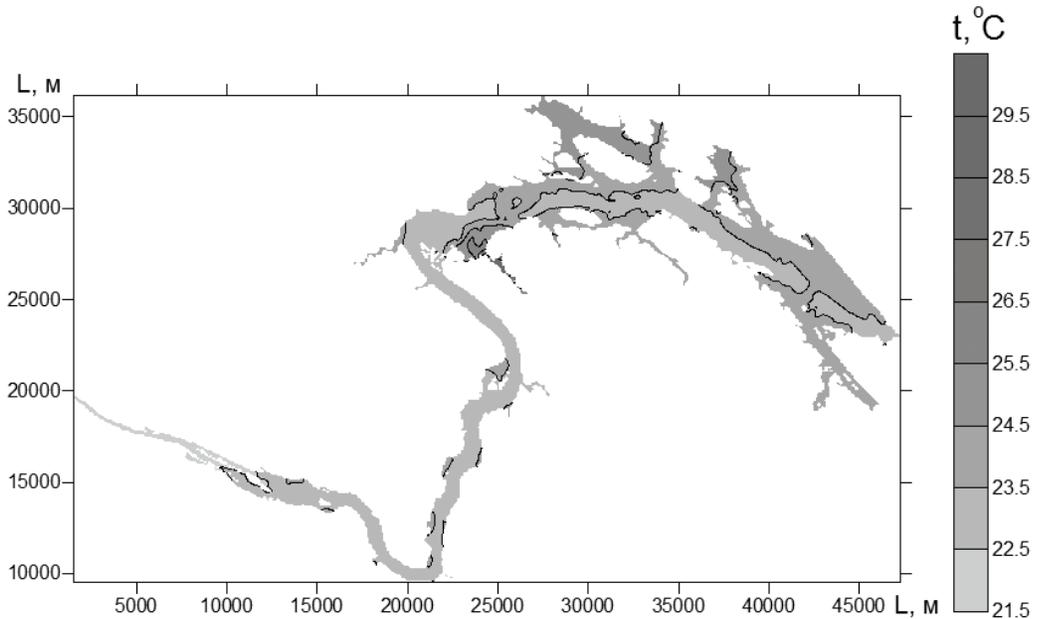


Рис. 5. Пример распределения температуры поверхности водохранилища летом 2011 г.

Динамическая структура Ивановского водохранилища 26 августа 2011 г. может быть кратко охарактеризована планом поверхностных скоростей (рис. 6). Наибольшие скорости наблюдаются в верхней (западной) части Волжского плеса здесь они достигают 10—15 см/с. В восточной части Волжского плеса, ориентированной с юга на север, наблюдаются скорости 3—6 см/с. В западной части Ивановского плеса скорости течения изменяются от 1 см/с до 4 см/с. В приплотинной части водохранилища средние скорости течения составляют 2—4 см/с. Во всех областях течения направлены от верхней части водохранилища к плотине, противоположно направленным течением не наблюдается.

Большой интерес представляет собой оценка термической структуры водохранилища, возможной при экстремально жарких погодных условиях, что может являться следствием глобального изменения климата, и увеличения мощности Конаковской ГРЭС, что может быть вызвано дальнейшим развитием московского региона. Моделирование Ивановского водохранилища в этом модельном эксперименте проводилось при условиях среднего многолетнего поступления воды в водохранилище. Выбор экстремальных условий осуществлялся с использованием ранжирования всех сроков метеорологических наблюдений за летние месяцы 2010 и 2011 гг. по температуре воздуха. Для моделирования использовались метеоданные, соответствующие 3%-ной обеспеченности температуры воздуха. Были выбраны такие погодные условия: температура воздуха $T = 34$ °С, температура точки росы $Td = 17$ °С, скорость ветра $U = 0$ м/с, общая облачность $Nc = 0$ баллов, давление $P = 100\,002$ Па. В модельном эксперименте они сохранялись постоянными для всего периода моделирования (три месяца).

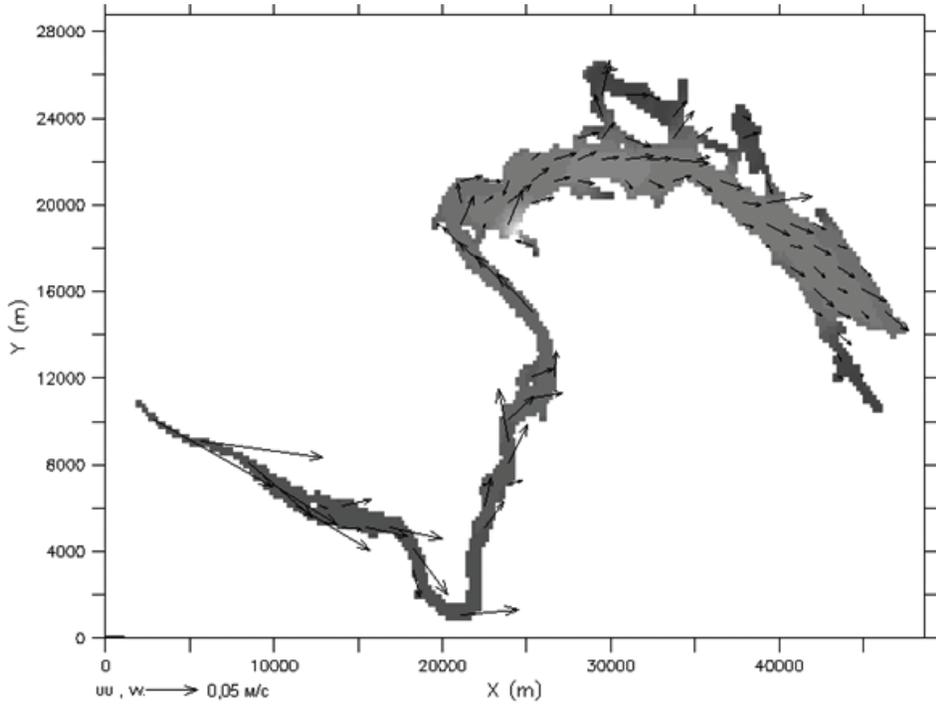


Рис. 6. Поверхностные скорости течения в Иваньковском водохранилище

Проведение модельного эксперимента дало следующие результаты (рис. 7). Зона влияния подогретых вод Мошковичевского залива увеличилась до 2 км от устья залива. Температура поверхности большей части водохранилища достигает 28 °С, а в некоторых мелководных заливах Иваньковского плеса — 31 °С. Вместе с тем общая тенденция к увеличению температуры воды от верховьев водохранилища к приплотинной его части осталась неизменной.

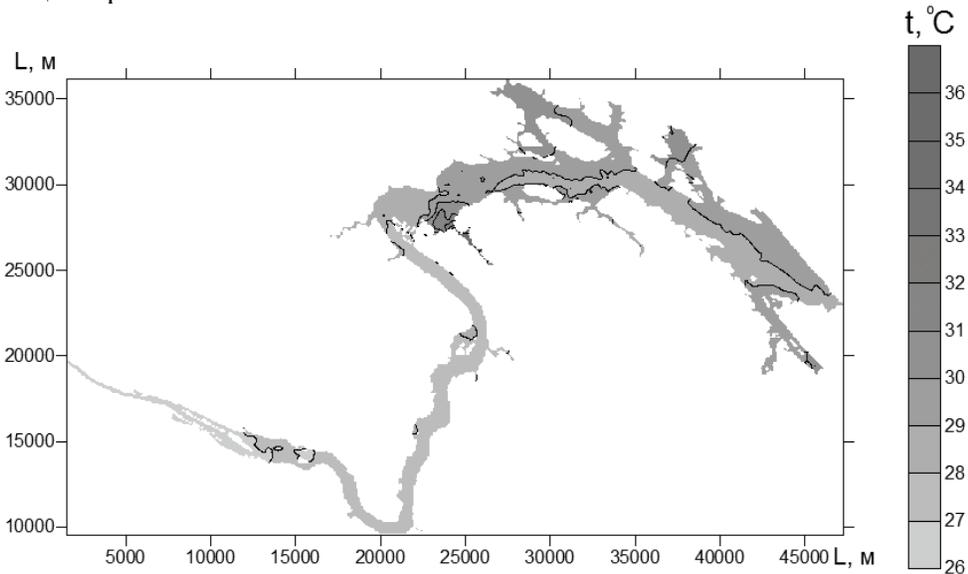


Рис. 7. Моделирование Иваньковского водохранилища в условиях экстремально жаркой погоды

Проведено успешное моделирование термогидродинамической структуры Ивановского водохранилища. Динамический режим водоема характеризуется постепенным уменьшением скорости течения от 10—15 см/с в верхней части водохранилища до 1—3 см/с в приплотинной части. Термический режим водохранилища в существующих погодных условиях характеризуется тенденцией к увеличению температуры поверхности воды по направлению к плотине; зона теплового влияния Мошковичевского залива распространяется на 1 км от его устья. При экстремальных погодных условиях наблюдается значительное повышение температуры поверхности водохранилища, а зона влияния подогретых вод ГРЭС увеличивается до 2 км от устья Мошковичевского залива.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ивановское водохранилище и его жизнь. — Л., 1987. [Ivankovskoe vodohranilishche i ego zhizn. — L., 1987.]
- [2] *Richard Hofmeister, Hans Burchard, Karsten Bolding.* A three-dimensional model study on processes of stratification and de-stratification in the Limfjord // *Continental Shelf Research.* — 2009. — 29. — P. 1515—1524.

THE MODELING OF THE THERMOHYDRODYNAMIC REGIME OF IVANKOVSKOYE RESERVOIR

G.A. Saminsky

Water Problems Institute RAS
Gubkina str., 3, Moscow, Russia, 119333

Numerical three-dimensional modeling of Ivankovskoye reservoir allows to estimate the influence of thermal inflow of the electric power station Konakovskaya. The model have been used for studying a thermic structure of the reservoir upon extremely hot meteorological conditions.

Key words: thermohydrodynamics, modeling.