

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ РУСЛОВОГО ПРУДА МАЛОЙ РЕКИ

С. А. Поддубный, К. А. Подгорный, А. И. Цветков, М. В. Цветкова

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, Россия

Поступила в редакцию 28 марта 2012 г.

Аннотация: В статье рассматриваются особенности горизонтальной циркуляции воды в русловом пруду на малой реке Ильд. Выявлены условия формирования вертикальной термической структуры пруда и ее сезонной, суточной и внутрисуточной изменчивости. Обсуждены механизмы формирования термической структуры и поля течений.

Ключевые слова: пруд, циркуляция воды, термическая структура, изменчивость, формирование структуры.

Abstract: The article describes the features of horizontal circulation of water in the pond of a small river, the Ild. The article states the conditions for the formation of the vertical thermal structure of the pond and its seasonal and daily variability. The mechanisms of the formation of the thermal structure and flow fields are described.

Key words: pond, water circulation, thermal structure, variability, formation of structure.

В конце 1980-х гг. в бывшем СССР насчитывалось свыше 4000 водохранилищ с полным объемом более 1 млн. м³ каждое и около 150 тыс. прудов суммарной площадью > 500 тыс. га [3]. Во второй половине 1990-х годов в России эксплуатировалось более 2220 водохранилищ и прудов с объемом каждого > 1 млн. м³. Наибольшим количеством прудов и малых водохранилищ характеризовались Курская, Тамбовская и другие области Центрально-Черноземного экономического района, а также Московская, Челябинская, Астраханская области и Краснодарский край [7].

Наличие прудов на многих реках приводит к существенным изменениям водного режима, природных условий и хозяйственной деятельности на участках влияния регулирования стока [3]. Поэтому всестороннее изучение экосистем прудов и, прежде всего, их гидрологического режима имеет как фундаментальное научное, так и практическое значение.

Изучаемый в данной работе пруд находится в среднем течении малой р. Ильд, притоке Рыбинского водохранилища. Длина пруда составляет 55 м, ширина – 40 м. В период половодья и паводков длина пруда увеличивается до 65 м, а ширина – до

50 м, при этом площадь пруда может достигать 2270 м². В летнее-осеннюю межень площадь водоема составляет 1450 м². Максимальная глубина в зависимости от сезона года изменяется от 6 до 7 м, а средняя составляет 3,7 м [2]. Согласно комплексной классификации В. М. Мишона [4], исследуемый пруд относится к категории глубоких, малых с точки зрения площади зеркала воды, и очень малых с точки зрения объема воды. По функционально-генетической классификации этот водоем можно отнести к мельничным, русловым.

Цель настоящей работы заключается в выявлении особенностей гидродинамического и термического режимов пруда за многолетний период по данным полустационарных наблюдений и результатам математического моделирования.

Измерения гидрофизических характеристик в пруду (температуры и электропроводности воды) проводились в 2009-2010 годах на стандартных станциях через 1 м по глубине портативным зондом «YSI-85». Точность измерения температуры составила $\pm 0,1^\circ\text{C}$, электропроводности – $\pm 0,5\%$. На буйковой станции временные изменения температуры воды на отдельных горизонтах с дискретностью в 15 минут фиксировались портативными температурными логгерами Pro v2 – U22-001 и НОВО Pendant – UA-002-64 с точностью изме-

рения $\pm 0,2$ и $\pm 0,54^\circ\text{C}$, а также разрешающей способностью $0,02$ и $0,1^\circ\text{C}$ соответственно. Пространственная структура течений исследовалась свободно дрейфующими поплавками с установленными на них GPS логгерами ML-7 в конце апреля, мае и июне 2007 года. Регистрация географических координат производилась с дискретностью в 1 минуту с дальнейшим построением траекторий перемещения поплавков. Точность позиционирования GPS логгерами составляла не более 3 м. Срочные гидрометеорологические данные по восьми срокам наблюдений (расходы по р. Ильд, температура воздуха, а также скорость и направление ветра) были предоставлены Рыбинской Гидрометеобсерваторией.

Моделирование течений в русловом пруду в период гомотермии проводилось на основе решения системы уравнений Сен-Венана с использованием неявной, разнесенной по пространству и времени разностной схемы с применением метода переменных направлений [5]:

$$U = \frac{1}{h+V} \int_{-h}^V u dz, \quad V = \frac{1}{h+V} \int_{-h}^V v dz, \quad H = h+V, \quad (1)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial V}{\partial x} - fV + g \frac{U\sqrt{U^2+V^2}}{C^2 H} - \frac{1}{rH} t_x^s = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial U}{\partial y} + fU + g \frac{V\sqrt{U^2+V^2}}{C^2 H} - \frac{1}{rH} t_y^s = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

где U, V – проекции вектора средней по глубине скорости на оси координат, причем ось OX направлена на восток, ось OY – на север, ось OZ – вверх; V – возвышение свободной поверхности над отсчетной поверхностью уровня; h – расстояние от отсчетной поверхности уровня до дна; $H = h+V$ – полная глубина водоема в заданный момент времени; f – параметр Кориолиса; g – ускорение свободного падения; t_x^s, t_y^s – проекции касательного напряжения ветра на оси координат; r – плотность воды; C – коэффициент Шези.

При развитой турбулентности течения в соответствии с законом Ван-Дорна для расчета со-

ставляющих касательного напряжения ветра принимаются следующие соотношения:

$$t_x^s = qr_a W_a^2 \cos a_w, \quad t_y^s = qr_a W_a^2 \sin a_w,$$

где W_a – скорость ветра над водоемом, a_w – направление ветра, r_a – плотность воздуха, q – коэффициент гидравлического сопротивления на водной поверхности. Коэффициент Шези учитывает потерю энергии на преодоление сил трения, зависящих от степени шероховатости и поперечных размеров русла (или глубины водоема). Для его расчета применяются различные полуэмпирические формулы. В данной работе для определения коэффициента Шези использовалась более простая формула Маннинга.

Система уравнений (1)-(4) дополняется следующими граничными условиями. На твердом контуре задается условие непротекания, то есть равенство нулю нормальной составляющей средней по глубине скорости течения: $U_n = 0$. На жидкой границе используется условие излучения гравитационных волн:

$$U_n = V \sqrt{\frac{g}{H}}, \quad \text{если } \dot{U}_n \geq 0$$

$$\text{и } \begin{cases} U_n = V \sqrt{\frac{g}{H}}, & \text{если } \dot{U}_n \leq 0, \\ U_t = 0 \end{cases}$$

где \dot{U}_t – касательная составляющая средней по глубине скорости течения. В местах впадения рек используется энергетическое условие:

$$U_n^2 + gV = \frac{Q_{river}^2}{W_{river}^2 h_{river}^2},$$

где Q_{river} – расход воды, W_{river} – ширина створа, h_{river} – средняя глубина в створе реки.

Расчеты проводились на С-сетке Аракавы. Количество узлов сеточной области вдоль оси OX было равным 10, а вдоль оси OY – 12. Пространственный шаг расчетной сетки был постоянным по обоим направлениям горизонтальной плоскости и составлял 5 метров. Временной шаг для обеспечения устойчивости вычислений в соответствии с критерием Куранта-Фридрихса-Леви был выбран равным 0,5 секунды. Все переменные, входящие в систему уравнений, разнесены по пространству: составляющие вектора средней по глубине скорости течения вычисляются в полущелых узлах сетки, значения возвышения свободной поверхности над отсчетной поверхностью уровня вычисляются

ся в целых узлах, а полная глубина водоема в заданный момент времени – в центре расчетной ячейки. Пространственные производные в конвективных членах берутся с предыдущего временного слоя. Вычисления начинались при нулевых значениях скоростей течения воды и уровнях свободной поверхности и продолжались до установления, то есть до окончательного формирования устойчивой структуры течений.

Моделирование течений в период открытой воды проводилось при следующих условиях: 1) расход реки Ильд $4,43 \text{ м}^3/\text{с}$, ветер отсутствует; 2) расход реки Ильд $1,2 \text{ м}^3/\text{с}$, ветер отсутствует; 3) расход реки Ильд $0,98 \text{ м}^3/\text{с}$, скорость ветра $2,0 \text{ м/с}$, направление ветра 90 град. Глубина водоема меняется от $0,3$ до $6,5 \text{ м}$. При проведении расчетов наибольшая ширина водоема принималась равной 40 , а наибольшая длина – 55 м . В процессе проверки модели использовались данные измерений параметров течений дрейфующими поплавками.

По итогам наблюдений и расчетов были получены следующие данные. *Гидродинамический режим.* В результате совместного анализа данных натурных наблюдений и математического моделирования выявлено, что в период весеннего половодья и дождевых паводков гидродинамический режим пруда определяется исключительно величинами расходов р. Ильд.

Пик половодья реки в 2008 и 2010 годах приходился на первую декаду апреля, а в 2007 и 2009 годах соответственно на последнюю декаду марта и апреля. Среднедекадные величины расходов в половодье составляли $10\text{-}13 \text{ м}^3/\text{с}$. Интенсивные дождевые паводки отмечались в 2009 и 2010 годах в первой декаде июня и достигали в среднем за декаду $2\text{-}3 \text{ м}^3/\text{с}$. Измерения термогидродинамических характеристик проводились на спаде половодья и захватывали периоды летних дождевых паводков.

Как показали результаты математического моделирования, при расходах воды р. Ильд более $2 \text{ м}^3/\text{с}$ осредненная по вертикали устойчивая горизонтальная циркуляция воды формируется достаточно быстро – в течение $10\text{-}12$ мин. от момента начала вычислений. Данные моделирования и наблюдений свидетельствуют о том, что в пространственной структуре течений можно выделить несколько характерных структурных элементов. Так, вдоль западного берега наблюдается устойчивое транзитное стоковое течение с наибольшими скоростями до 65 см/с (рис. 1 а, б, г). Слева от оси

основного потока образуется циклоническое циркуляционное образование с горизонтальным размером 10 м вдоль наибольшей оси. Справа от стокового течения формируется большой антициклонический круговорот, внутри которого развиваются четыре более мелкие циркуляционные зоны. Размеры мелких циркуляций меняются от 5 до 20 м . В сформировавшейся структуре горизонтальной циркуляции средняя по акватории скорость переноса воды равна $23,1 \text{ см/с}$. По данным измерений максимальная скорость в стоковом течении составляет 45 , а средняя по акватории скорость переноса воды – 35 см/с .

В случае уменьшения расхода втекающей струи реки в $2\text{-}2,5$ раза устойчивая циркуляция воды в пруду формируется несколько дольше – спустя $40\text{-}45$ минут от начала вычислений. Однако пространственная структура течений остается аналогичной той, что была описана выше. Рассчитанные максимальная и средняя скорости переноса воды составляют $15,2$ и 6 см/с соответственно.

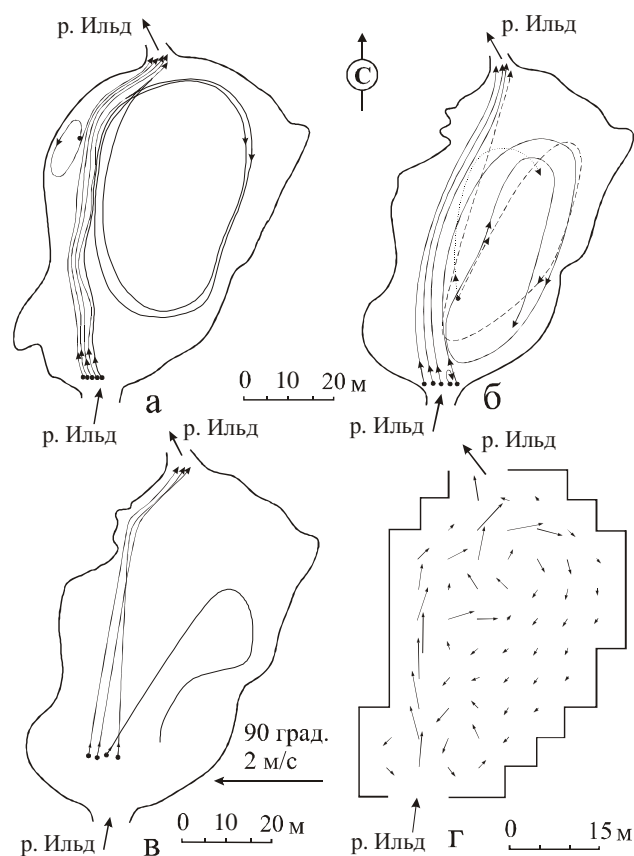


Рис. 1. Схемы горизонтальной циркуляции воды в русловом пруду р. Ильд: а – измерения 20.04.2007 г., б – измерения 03.05.2007 г., в – измерения 07.06.2007 г., г – рассчитанная циркуляция воды при расходе р. Ильд $4,43 \text{ м}^3/\text{с}$ и отсутствии ветра

Измеренные скорости течений изменяются от 14,5 до 2-3 см/с со средним значением 8,5 см/с.

Моделирование позволило установить, что воздействие ветра на водную поверхность в направлении, противоположном или перпендикулярном направлению стокового переноса воды, увеличивает время установления течений в пруду до 50-65 минут от начала вычислений. Пространственная же структура сформировавшейся горизонтальной циркуляции при этом не отличается от пространственной картины течений при других ветровых ситуациях. Максимальная рассчитанная скорость течения уменьшается до 12,5 см/с, а средняя по акватории пруда скорость – до 4,9 см/с (рис. 1 в). Во всех рассмотренных случаях циркуляционные образования формируются в результате пространственных изменений силы трения, которые связаны с изменением морфометрических особенностей пруда. Ветровое же воздействие на водоем не настолько существенное для того, чтобы оно могло привести к каким-либо качественным перестройкам установившейся структуры течения в пруду. Однако, как показали расчеты, его влияние приводит к увеличению времени установления течений.

В целом измеренные и рассчитанные по модели параметры течений показывают удовлетворительное качественное и количественное соответствие, что позволяет достаточно успешно применять используемую нестационарную гидродинамическую модель для характеристики структуры циркуляции воды в малых разнотипных водоемах.

В случае термической стратификации в период летней межени стоковое течение в поверхностном слое проявляется при расходах втекающей речной струи реки выше 0,3-0,5 м³/с. При более низких расходах в верхних слоях пруда формируется ветровое течение.

Термический режим. Термический режим пруда определяется поступлением солнечной радиации, термогидродинамическими взаимодействиями в приводном слое атмосферы, турбулентным перемешиванием, взаимодействием на границе раздела вода – дно, поступлением тепла с речным стоком. Тепловой баланс пруда Q_T , по аналогии с озерами, может быть представлен в виде следующей алгебраической суммы отдельных составляющих баланса [1]:

$$Q_T = Q_R + Q_A + Q_L + Q_S + Q_M + Q_K + Q_N + Q_B, \quad (5)$$

где Q_R – поглощенные прудом прямая и рассеянная солнечная радиации, Q_A – баланс тепла за счет

эффективного длинноволнового излучения поверхностью водоема и атмосферой, Q_L – изменение теплосодержания при испарении и конденсации, Q_S – изменение теплосодержания за счет контактного теплообмена с атмосферой, Q_M – изменение теплосодержания при ледообразовании, Q_K – обмен теплом с донными осадками, Q_N – изменение теплосодержания за счет поступления подземных вод, Q_B – изменение теплосодержания за счет притока и стока.

В термическом цикле пруда выделяется фаза прогрева водоема и фаза его охлаждения. В фазе прогрева, в свою очередь, можно выделить периоды интенсивного горизонтального и вертикального перемешивания (спад половодья и дождевые паводки), а также период летней межени. При интенсивном перемешивании водной толщи в результате поступления речной воды с расходами более 0,3 м³/с до третьей декады июня в пруду сохраняется гомотермия (рис. 2 а, б). При расходах реки менее 0,3 м³/с и началом в первой декаде июля летней межени в пруду образуется вертикальная термическая структура, формирование которой заканчивается к середине месяца. На начальной стадии формирования стратификации термоклин располагается на глубине 4-5,5 м и впоследствии постепенно поднимается в средние слои на глубины от 2 до 4 м (рис. 2 в, г). Осенняя гомотермия наступает в начале октября при достижении температуры воды поверхностного слоя пруда менее 9°C (рис. 2 а).

Синхронный анализ гидрометеорологических данных позволил выявить некоторые особенности формирования, а также суточной и внутрисуточной вертикальной изменчивости температуры воды в рассматриваемом русловом пруду. С использованием спектрального анализа выявлено, что основные периоды колебаний среднесуточной температуры воздуха составляют 6 и 12-14 часов и носят синоптический характер. В течение фазы охлаждения пруда с конца июля до начала октября 2009 года суточные амплитуды температуры воздуха изменялись от 0,5 до 16 С и в среднем составили 7°C. Средние за исследованный период температуры воды в реке и в верхнем слое пруда (0-2 м) были идентичны – 14,8 и 15,1°C соответственно. Средняя суточная амплитуда колебаний температуры воды в пруду на поверхности составила 2,6, а на горизонте 2 м – 0,5°C. В средних и придонных слоях воды колебания температуры отсутствовали (рис. 3). Сток реки в период летне-осенней межени не превышал 0,17 м³/с.

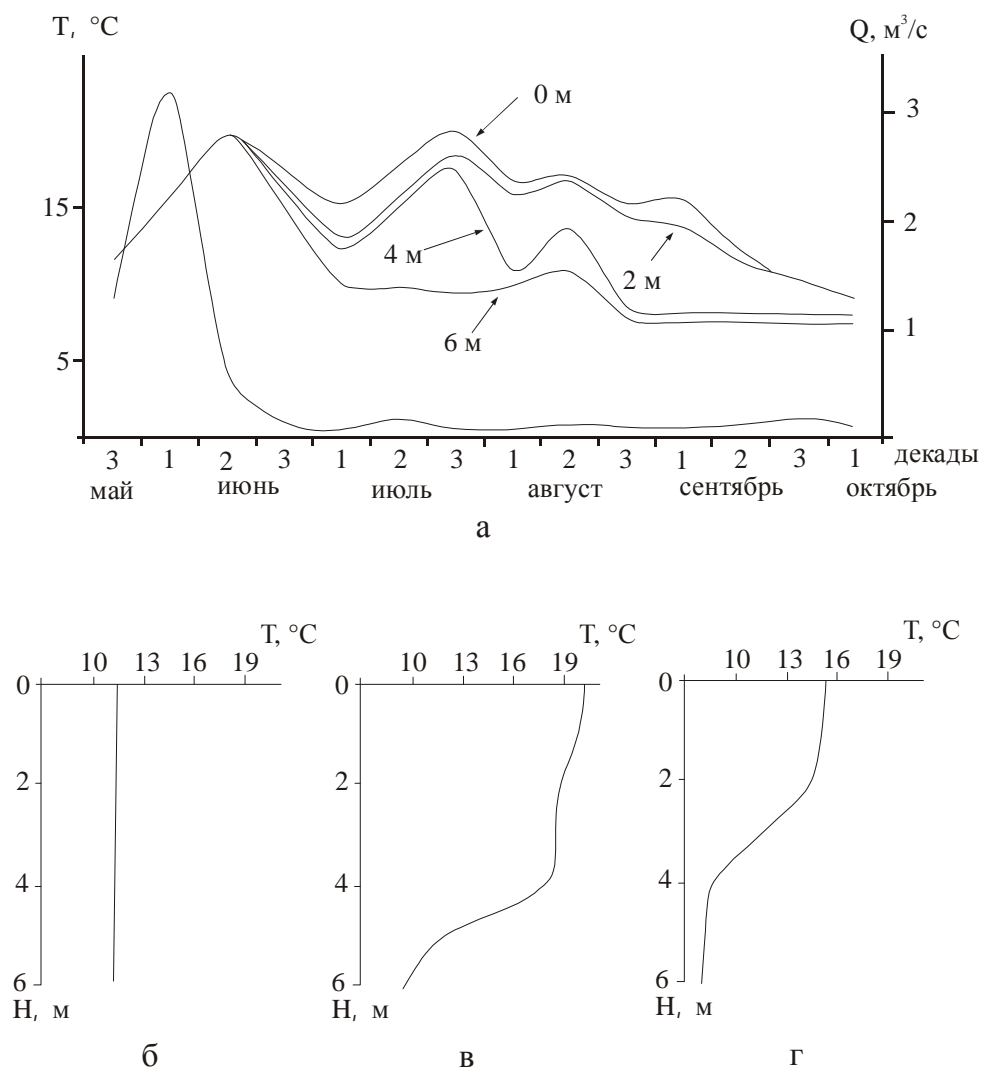


Рис. 2. Сезонные изменения температуры воды на отдельных горизонтах в русловом пруду р. Ильд в 2009 г. (а) и вертикальные профили температуры воды в пруду: б – 21 мая, в – 21 июля, г – 25 августа. 1 – гидрограф р. Ильд

В течение фазы нагрева (май-июль 2010 г.) при наличии сильно турбулизированного втекающего речного потока на фоне синоптических колебаний температуры воздуха изменения температур воды по всей толще пруда и температуры воды реки аналогичны друг другу (рис. 4). Амплитуды суточных температур воздуха изменяются от 1,9 до 19,5°C со средним значением 9°C. На поверхности пруда (горизонталь 0,3 м) средние суточные амплитуды температуры воды не превышают 2°C, а глубже 2 м – составляют 1,2°C. С уменьшением расходов реки до 0,3 м³/с и ростом температуры воздуха в пруду начинает формироваться вертикальная температурная стратификация (30.05-05.06.2010 г.), которая быстро разрушается с прохождением дождевого паводка (рис. 4). Окончательно стратификация устанавливается к середине июля. При этом

температуры воды реки и верхнего слоя пруда отличаются друг от друга не более чем на 1°C. Охлаждение воды в пруду начинается 25 июня с придонного слоя (6 м) со скоростью 0,4°C/сутки. На горизонте 4 м температура воды начинает понижаться спустя трое суток (28 июня) также со скоростью 0,4°C/сутки (рис. 4).

Внутрисуточные изменения температуры поверхностного слоя воды в пруду определяются суточным ходом температуры воздуха. В период фазы охлаждения максимум дневной температуры воздуха наступает в среднем в 15 час. 20 мин. В поверхностном слое пруда максимальных значений температура воды достигает через 1 час (в 16 час. 20 мин.). Максимум температуры на горизонтали 2 м фиксируется в 20 час. 20 мин., т.е. спустя 5 часов после наступления максимальной температуры воздуха (рис. 5 а).

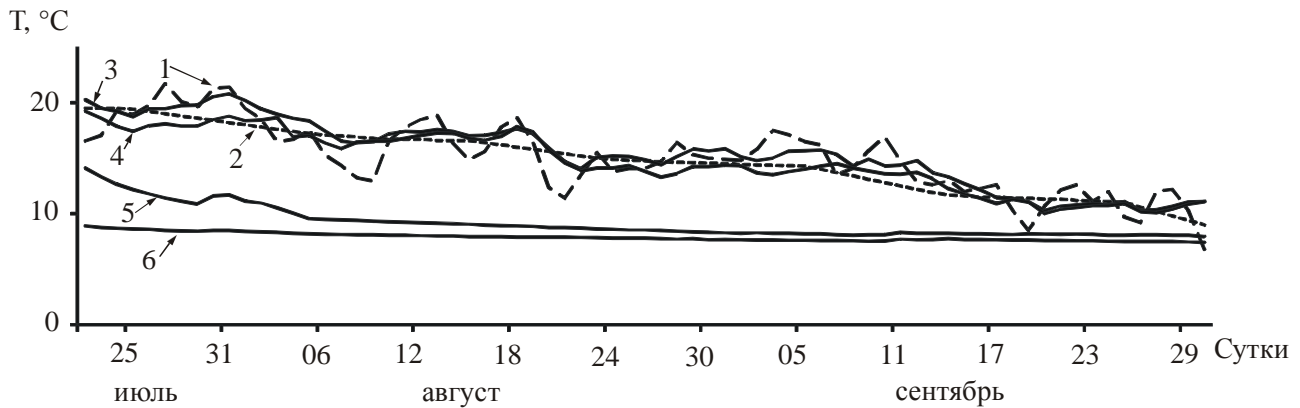


Рис. 3. Динамика температуры воды отдельных горизонтов в русловом пруду р. Ильд в период фазы охлаждения (июль-сентябрь 2009 г.)

1 – температура воздуха, 2 – температура воды реки, 3 – поверхность пруда, 4 – гор. 2 м, 5 – гор. 4 м, 6 – гор. 6 м

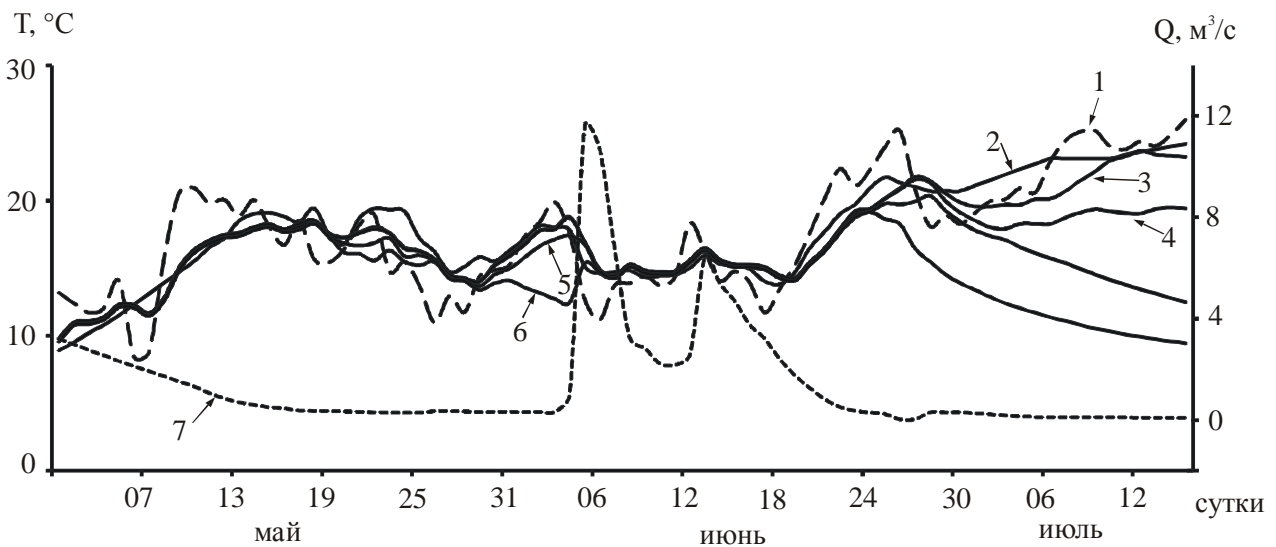


Рис. 4. Динамика температуры воды на отдельных горизонтах в русловом пруду р. Ильд в период фазы нагрева (май-июль 2010 г.)

1 – температура воздуха, 2 – температура воды реки, 3 – поверхность пруда, 4 – гор. 2 м, 5 – гор. 4 м, 6 – гор. 6 м, 7 – гидрограф р. Ильд

В период фазы нагрева закономерности внутрисуточных изменений температуры воздуха и температуры воды в пруду в целом аналогичны рассмотренным выше для фазы охлаждения водоема. Так, максимум дневного прогрева воздуха наступает в 15 час., а максимум температуры воды поверхностного слоя наблюдается в 17 час. При повышенных речных расходах температура воды на горизонтали глубже 2 м достигает своего максимума в 18 час. (рис. 5 б). На протяжении первых десяти суток от момента формирования стратификации время наступления максимальной температуры воды на горизонтали 2 м постепенно сдвигается от 18 час. до начала следующих суток. К середине июля амплитуда внутрисуточных колеба-

ний температуры на горизонтали 2 м уменьшается до 0,2°C (рис. 5 в).

Проведенный анализ сезонной суточной и внутрисуточной изменчивости температуры воды позволяет в общих чертах определить следующие механизмы формирования вертикальной термической стратификации в русловом пруду р. Ильд.

В период половодья и дождевых паводков при расходах втекающей речной воды более 0,3 м³/с изменение теплосодержания пруда главным образом определяется притоком и стоком реки (слагаемое Q_B в ур. 5). В это время весь объем пруда заполнен речной водой с пониженной удельной электропроводностью 250-350 мкСм/см.

К моменту наступления летне-осенней межени вода в пруду постепенно заменяется межени-

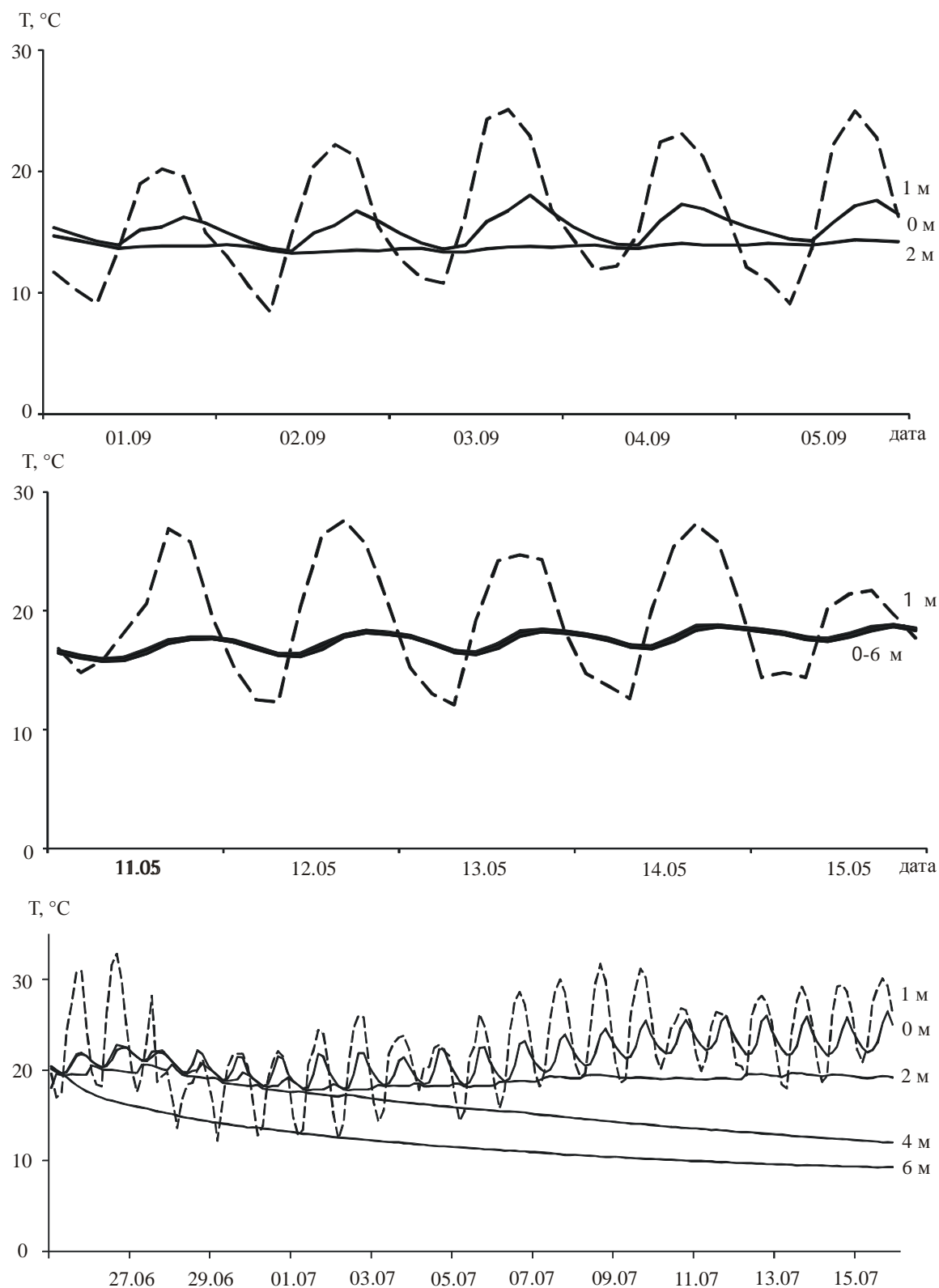


Рис. 5. Динамика температуры воздуха (1) и температуры воды на отдельных горизонтах в русловом пруду р. Ильд: а – в 2009 г.; б – в период гомотермии в 2010 г.; в – в период стратификации в 2010 г.

ми водами реки с электропроводностью 500-550 мкСм/см. На формирование вертикального профиля температуры оказывают влияние разнонаправленные процессы: поступление солнечной радиации, термогидродинамическое взаимодействие в приводном слое атмосферы и турбулентное перемешивание (слагаемые Q_R , Q_A , Q_L , Q_S в ур. 5) с одной стороны, а также взаимодействие на границе раздела вода-дно посредством поступления подземных вод через донные ключи (слагаемые Q_K , Q_N в ур. 5) с другой. Исходя из анализа временных рядов температуры воды в пруду на горизонтали 4 и 6 м, следует предположить, что ее понижение в придонном слое водоема происходит в результате поступления холодной высокоминерализованной грунтовой воды из донных ключей. Косвенным подтверждением этому служит постепенное повышение электропроводности воды в придонном слое от 500 мкСм/см в начале июля до 610-650 мкСм/см к середине июля. [6].

Ввиду незначительной средней за рассматриваемые периоды скорости ветра (~2 м/с) вертикальный турбулентный обмен в верхнем слое пруда оказывается не достаточно значимым для переноса тепла в нижние слои водной толщи. Поэтому колебания температуры воды практически отсутствуют, начиная уже с горизонта 2 м.

Таким образом, формирование вертикальной термической структуры в исследуемом русловом пруду в значительной степени обусловлено поступлением холодной высокоминерализованной подземной воды от дна в верхние слои пруда. И в этом состоит его отличительная особенность, поскольку в малых озерах типичным механизмом формирования термоклина является вертикальное турбулентное перемешивание, переносящее тепло из верхних слоев озера в нижние.

Поддубный Сергей Артурович

доктор географических наук, заместитель директора по научной работе Учреждения Российской академии наук Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН, пос. Борок Ярославской области, т. 8(48547)24514, E-mail: spod@ibiw.yaroslavl.ru

Подгорный Константин Алексеевич

старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной экологии Учреждения Российской академии наук Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН, пос. Борок Ярославской области, т. 8(48547)24129, E-mail: kap@ibiw.yaroslavl.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 09-05-00029).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бояринов П. М. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов / П. М. Бояринов, М. П. Петров. – Ленинград : Наука, 1991. – 176 с.
2. Гидрологический режим русловых прудов малых рек (на примере р. Ильд) / М. В. Цветкова [и др.] // Эко-системы малых рек: биоразнообразие, экология, охрана : лекции и материалы докладов Всероссийской школы-конференции Института биологии внутренних вод РАН, 18-21 ноября 2008 г. – Ярославль : Принтхаус, 2008. – С. 323-326.
3. Кирвель И. И. Благоустройство малых водосборов искусственными водоемами / И. И. Кирвель, П. С. Лопух, В. М. Широков. – Минск : БелНИИТИ, 1989. – 63 с.
4. Мишон В. М. Функционально-генетическая классификация прудов Центрального Черноземья / В. М. Мишон // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. География. Геоэкология. – Воронеж, 2003. – № 2. – С. 23-32.
5. Подгорный К. А. Математическое моделирование пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов (алгоритмы и численные методы) / К. А. Подгорный. – Рыбинск : ОАО Рыбинский Дом печати, 2003. – 328 с.
6. Цветкова М. В. Гидролого-гидрохимическая характеристика руслового пруда на малой реке (р. Ильд, бассейн Рыбинского водохранилища, Ярославская обл.) / М. В. Цветкова, Н. Г. Отюкова // Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России : материалы научно-практической конференции, Азов, 8-10 июня 2009 г. – Ростов-на-Дону, 2009. – Ч. 1. – С. 236-239.
7. Эдельштейн К. К. Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения / К. К. Эдельштейн. – Москва : ГЕОС, 1998. – 277 с.

Poddubny Sergei Arturovitch

Doctor of Geography, Deputy of Director for Research of Institute of Biology of Internal Waters named after I. D. Papanin of the Russian Academy of Sciences, Borok, Yaroslavl region, tel. 8(48547)24514, E-mail: spod@ibiw.yaroslavl.ru

Podgorny Konstantin Alekseyevitch

Senior Researcher of the Laboratory of Experimental Ecology of the Institute of Biology of Internal Waters named after I. D. Papanin of the Russian Academy of Sciences, Borok, Yaroslavl region, tel. 8(48547)24129, E-mail: kap@ibiw.yaroslavl.ru

Цветков Александр Игоревич
научный сотрудник лаборатории гидрологии и гидрохимии Учреждения Российской академии наук Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН, пос. Борок Ярославской области, т. 8(48547)24558, E-mail: cai@ibiw.yaroslavl.ru

Цветкова Марина Валерьевна
младший научный сотрудник лаборатории гидрологии и гидрохимии Учреждения Российской академии наук Института биологии внутренних вод им. И. Д. Папанина РАН, пос. Борок Ярославской области, т. 8(48547)24558, E-mail: kistra@ibiw.yaroslavl.ru

Tsvetkov Alexander Igorevitch
Researcher of the Laboratory of hydrology and hydrochemistry of the Institute of Biology of Internal Waters named after I. D. Papanin of the Russian Academy of Sciences, Borok Yaroslavl region, tel. 8(48547)24558, E-mail: cai@ibiw.yaroslavl.ru

Tsvetkova Marina Valer'yevna
Junior Researcher of the Laboratory of hydrology and hydrochemistry of the Institute of Biology of Internal Waters named after I. D. Papanin of the Russian Academy of Sciences, Borok, Yaroslavl region, tel. 8(48547)24558, E-mail: kistra@ibiw.yaroslavl.ru