

УДК 556.555+556.556

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

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА И ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ РУСЛОВОГО ПРУДА МАЛОЙ РЕКИ

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.

Введение

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 [2]. Во второй половине 1990-х гг. в России эксплуатировалось более 2220 водохранилищ и прудов с объемом каждого > 1 млн м³. Наибольшим количеством прудов и малых водохранилищ характеризовались Пензенская, 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 [2]. 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, притока 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 летне-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 [6]. Согласно комплексной классификации В.М. Мишона [3], исследуемый пруд относится к категории глубоких, малых — с точки зрения площади зеркала воды и очень малых — с точки зрения объема воды прудов. По функционально-генетической классификации этот пруд можно отнести к мельничным, русловым.

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

Материал и методы исследования

Измерения гидрофизических характеристик в пруду (температуры и электропроводности воды) проводились в 2009-2010 гг. на стандартных станциях через 1 м по глубине портативным зондом «YSI-85». Точность измерения температуры составила ± 0.1 °С, электропроводности — $\pm 0,5\%$. На буйковой станции временные изменения температуры воды на отдельных горизонтах с дискретностью в 15 мин. фиксировались портативными температурными логгерами НОВО Pro v2 —

© Поддубный С.А., Подгорный К.А., Цветков А.И., Цветкова М.В., 2013

Поддубный Сергей Артурович, доктор географических наук, заместитель директора по научной работе Российской академии наук, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина; spod@ibiw.yaroslavl.ru

Подгорный Константин Алексеевич, старший научный сотрудник лаборатории экспериментальной экологии Российской академии наук, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина; kap@ibiw.yaroslavl.ru

Цветков Александр Игоревич, научный сотрудник лаборатории гидрологии и гидрохимии Российской академии наук, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина; cai@ibiw.yaroslavl.ru

Цветкова Марина Валерьевна, младший научный сотрудник лаборатории гидрологии и гидрохимии Российской академии наук, Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина; kistra@ibiw.yaroslavl.ru

U22-001 и НОВО Pendant – UA-002-64 с точностью измерения $\pm 0,2$ и $\pm 0,54$ °С, а также разрешающей способностью 0,02 и 0,1°С соответственно. Пространственная структура течений исследовалась свободно дрейфующими поплавками с установленными на них GPS-логгерами ML-7 в конце апреля, мае и июне 2007 г. Регистрация географических координат производилась с дискретностью в 1 мин. 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 Гидрометеообсерваторией.

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 [4]:

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

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

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

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

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; ζ — возвышение свободной поверхности над отсчетной поверхностью уровня; h — расстояние от отсчетной поверхности уровня до дна; $H = h + \zeta$ — полная глубина водоема в заданный момент времени; f — параметр Кориолиса; g — ускорение свободного падения; τ_x^s, τ_y^s — проекции касательного напряжения ветра на оси координат; ρ — плотность воды; C — коэффициент Шези.

При развитой турбулентности течения в соответствии с законом Ван-Дорна для расчета составляющих касательного напряжения ветра принимаются следующие соотношения:

$$\tau_x^s = \theta \rho_a W_a^2 \cos \alpha_w, \tau_y^s = \theta \rho_a W_a^2 \sin \alpha_w,$$

где W_a — скорость ветра над водоемом, α_w — направление ветра, ρ_a — плотность воздуха, θ — 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, т.е. равенство нулю нормальной составляющей средней по глубине скорости течения: $\vec{U}_n = 0$. На жидкой границе используется условие излучения гравитационных волн:

$$\vec{U}_n = \zeta \sqrt{\frac{g}{H}}, \text{ если } \vec{U}_n \geq 0 \text{ и } \begin{cases} \vec{U}_n = \zeta \sqrt{\frac{g}{H}}, & \text{если } \vec{U}_n \leq 0, \\ \vec{U}_\tau = 0, & \end{cases}$$

где \vec{U}_τ — касательная составляющая средней по глубине скорости течения. В местах впадения рек используется энергетическое условие:

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

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 ОХ было равным 10, а вдоль оси ОУ — 12. Пространственный шаг расчетной сетки был постоянным по обоим направлениям горизонтальной плоскости и составлял 5 м. Временной шаг для обеспечения устойчивости вычислений в соответствии с критерием Куранта — Фридрихса — Леви был выбран равным 0,5 с. 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 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, т.е. до окончательного формирования устойчивой структуры течений.

Моделирование течений в период открытой воды проводилось при следующих условиях: 1) расход р. Ильд 4,43 м³/с, ветер отсутствует; 2) расход р. Ильд 1,2 м³/с, ветер отсутствует; 3) расход р. Ильд 0,98 м³/с, скорость ветра 2,0 м/с, направление ветра 90 град. Глубина водоема меняется от 0,3 до 6,5 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.

Результаты и их обсуждение

Гидродинамический режим. В результате совместного анализа данных натуральных 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 г. приходился на первую декаду апреля, а в 2007 и 2009 г. соответственно на последнюю декаду марта и апреля. Среднедекадные величины расходов в половодье составляли 10–13 м³/с. Интенсивные дождевые паводки отмечались в 2009 и 2010 г. в первой декаде июня и достигали в среднем за декаду 2–3 м³/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 м³/с осредненная по вертикали устойчивая горизонтальная циркуляция воды формируется достаточно быстро — в течение 10–12 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 сформированной структуре горизонтальной циркуляции средняя по акватории скорость переноса воды равна 23,1 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 2–2,5 раза устойчивая циркуляция воды в пруду формируется несколько дольше — спустя 40–45 мин. 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. Измеренные скорости течений изменяются от 14,5 до 2–3 см/с со средним значением 8,5 см/с.

Моделирование показало также, что воздействие ветра на водную поверхность в направлении, противоположном или перпендикулярном направлению стокового переноса воды, увеличивает время установления течений в пруду до 50–65 мин. от начала вычислений. Пространственная же структура сформированной 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.

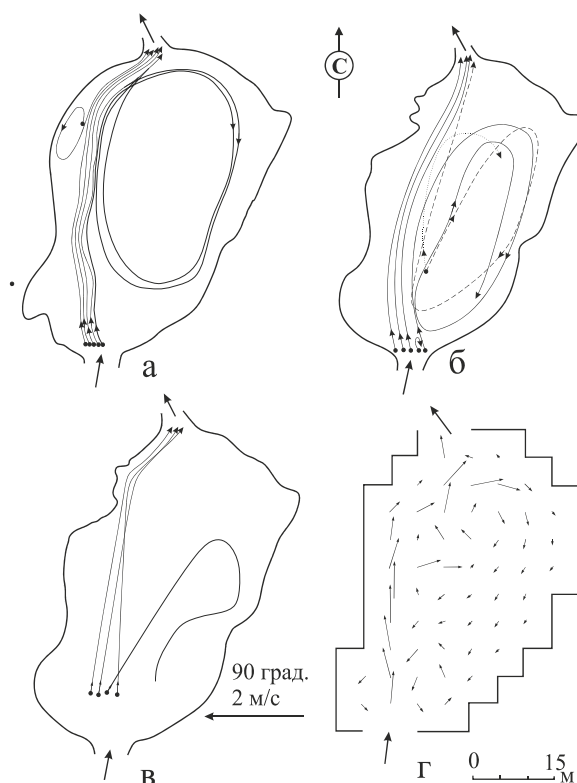


Рис. 1. Схемы горизонтальной циркуляции воды в русловом пруду р. Ильд:
а — измерения 20.04.2007 г., б — измерения 03.05.2007 г., в — измерения 07.06.2007 г.,
г — рассчитанная циркуляция воды при расходе р. Ильд $4,43 \text{ м}^3/\text{с}$ и отсутствии ветра

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 свыше $0,3\text{--}0,5 \text{ м}^3/\text{с}$. 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 $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$ до третьей декады июня в пруду сохраняется гомотермия (рис. 2 а, б).

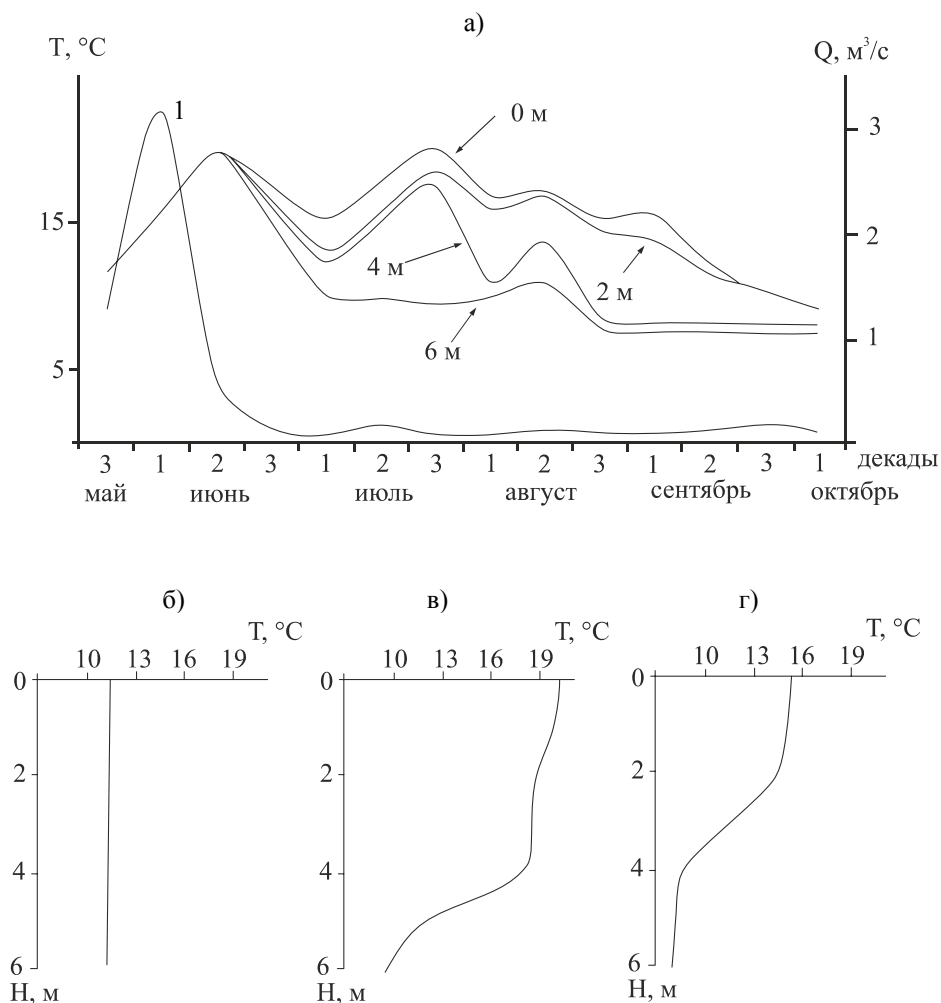


Рис. 2. а — Сезонные изменения температуры воды на отдельных горизонтах в русловом пруду р. Ильд в 2009 г., вертикальные профили температуры воды в пруду: б — 21 мая, в — 21 июля, г — 25 августа. 1 — гидрограф р. Ильд

При расходах реки менее $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$ 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 $9 ^\circ\text{C}$ (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 г. суточные амплитуды температуры воздуха изменялись от $0,5$ до $16 ^\circ\text{C}$ и в среднем составили $7 ^\circ\text{C}$. Средние за исследованный период температуры воды в реке и в верхнем слое пруда (0–2 м) были идентичны – $14,8$ и $15,1 ^\circ\text{C}$ соответственно. Средняя суточная амплитуда колебаний температуры воды в пруду на поверхности составила $2,6$, а на горизонте 2 м – $0,5 ^\circ\text{C}$. В средних и придонных слоях воды колебания температуры отсутствовали (рис. 3). Сток реки в период летне-осенней межени не превышал $0,17 \text{ м}^3/\text{с}$.

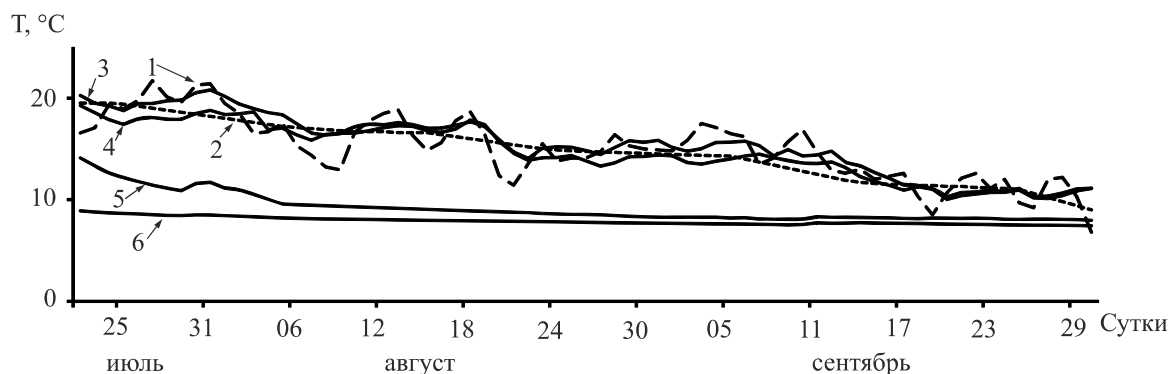


Рис. 3. Динамика температуры воды на отдельных горизонтах в русловом пруду р. Ильд в период фазы охлаждения (июль – сентябрь 2009 г.):
1 — температура воздуха, 2 — температура воды реки,
3 — поверхность пруда, 4 — гор. 2 м, 5 — гор. 4 м, 6 — гор. 6

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 °С со средним значением 9 °С. На поверхности пруда (гор. 0,3 м) средние суточные амплитуды температуры воды не превышают 2 °С, а глубже 2 м – составляют 1,2 °С. 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 °С. Охлаждение воды в пруду начинается 25 июня с придонного слоя (6 м) со скоростью 0,4 °С/сутки. На горизонте 4 м температура воды начинает понижаться спустя трое суток (28 июня) также со скоростью 0,4 °С/сутки (рис. 4).

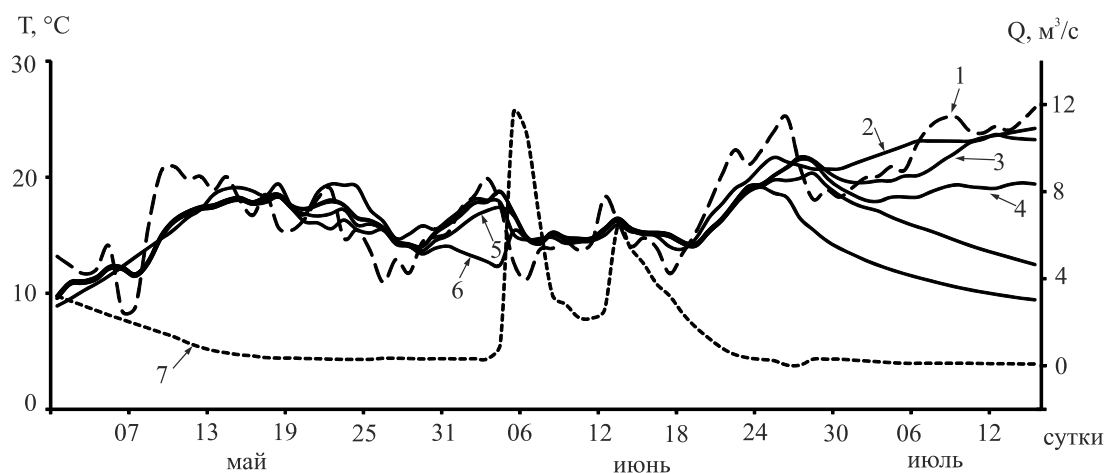


Рис. 4. Динамика температуры воды на отдельных горизонтах в русловом пруду р. Ильд в период фазы нагрева (май – июль 2010 г.):
1 — температура воздуха, 2 — температура воды реки, 3 — поверхность пруда, 4 — гор. 2 м,
5 — гор. 4 м, 6 — гор. 6 м, 7 — гидрограф р. Ильд

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 ч 20 мин. В поверхностном слое пруда максимальных значений температура воды достигает через 1 ч (в 16 ч 20 мин.). Максимум температуры на гор. 2 м фиксируется в 20 ч 20 мин., т.е. спустя 5 ч после наступления максимальной температуры воздуха (рис. 5 а).

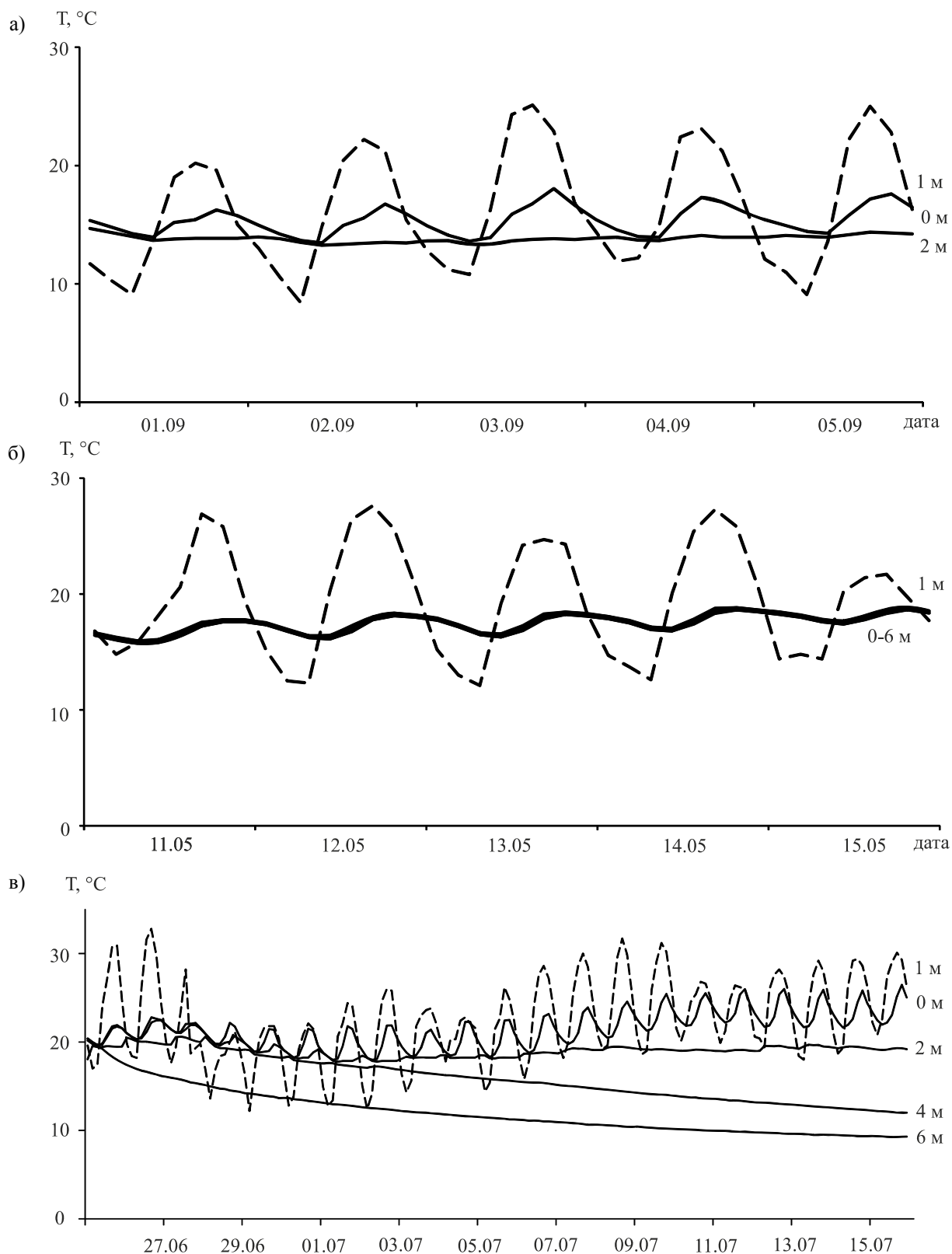


Рис. 5. Динамика температуры воздуха (1) и температуры воды на отдельных горизонтах в русловом пруду р. Ильд: а — в 2009 г.; б — в период гомотермии в 2010 г.; в — в период стратификации в 2010 г.

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 ч, а максимум температуры воды поверхностного слоя наблюдается в 17 ч. При повышенных речных расходах температура воды на гор. глубже 2 м достигает своего максимума в 18 ч (рис. 5 б). На протяжении первых десяти суток от

момента формирования стратификации время наступления максимальной температуры воды на гор. 2 м постепенно сдвигается от 18 ч до начала следующих суток. К середине июля амплитуда внутрисуточных колебаний температуры на гор. 2 м уменьшается до 0.2 °С (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 меженными 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 гор. 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 [5].

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.

Заключение

Русловые пруды на малых реках являются неотъемлемой частью их аквальных ландшафтов. Русловые пруды не только имеют, несомненно, рекреационное и водохозяйственное значение, но и играют большую роль в увеличении биологического разнообразия речных экосистем. К прудам могут быть приурочены бобровые поселения. Кроме того, пруды служат временным убежищем для водоплавающих птиц в периоды их миграционных циклов. Наконец, пруды могут служить нерестовыми, нагульными и зимовальными участками для разнообразного рыбного населения малой реки. Следовательно, комплексное исследование гидрологического и гидробиологического режима прудов позволяет целостно подойти к изучению их внутризкосистемных связей, наметить необходимые природоохранные мероприятия по сохранению и восстановлению экосистем этих малых водных объектов.

Библиографический список

1. Бояринов П.М., Петров М.П. Процессы формирования термического режима глубоких пресноводных водоемов. Л.: Наука, 1991. 176 с.
2. Кирвель И.И., Лопух П.С., Широков В.М. Благоустройство малых водосборов искусственными водоемами. Минск: БелНИИНТИ, 1989. 63 с.
3. Мишон В.М. Функционально-генетическая классификация прудов Центрального Черноземья // Вестник ВГУ: Серия География. Геоэкология. 2003. № 2. С. 23–32.

4. *Подгорный К.А.* Математическое моделирование пресноводных экосистем нестратифицированных водоемов (алгоритмы и численные методы). Рыбинск: ОАО «Рыбинский Дом печати», 2003. 328 с.

5. *Цветкова М.В., Отюкова Н.Г.* Гидролого-гидрохимическая характеристика руслового пруда на малой реке (р. Ильд, бассейн Рыбинского водохранилища, Ярославская обл.): материалы науч.-практич. конф. «Современные фундаментальные проблемы гидрохимии и мониторинга качества поверхностных вод России». Ростов н/Д, 2009. Ч 1. С. 236–239.

6. *Цветкова М.В. и др.* Гидрологический режим русловых прудов малых рек (на примере р. Ильд) // Экосистемы малых рек: биоразнообразие, экология, охрана: лекции и материалы докладов Всерос. школы-конф. ИБВВ РАН. Ярославль: Принтхаус, 2008. С. 323–326.

7. *Эдельштейн К.К.* Водоохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.

S.A. Poddubnyi, K.A. Podgorny, A.I. Tsvetkov, M.V. Tsvetkova

FEATURES OF HYDRODYNAMIC REGIME AND THE THERMAL STRUCTURE OF CHANNEL POND SMALL RIVER

Abstract: Patterns of horizontal water circulation in a channel pond of the small river Ild' are considered. The conditions of formation of the vertical thermal structure of the pond and its seasonal, diurnal and within-day variations have been determined. The mechanisms of formation of the thermal structure and flow fields are discussed.

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

Sergei A. Poddubnyi, Doctor of Geography, Deputy Director of the Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, Borok Yaroslavl; spod@ibiw.yaroslavl.ru.

Konstantin A. Podgorny, Senior Research Scientist of the Laboratory of Experimental Ecology of the Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, Borok Yaroslavl; kap@ibiw.yaroslavl.ru.

Alexander I. Tsvetkov, Research Scientist of the Laboratory of Hydrology and Hydrochemistry of the Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, Borok Yaroslavl; cai@ibiw.yaroslavl.ru.

Marina V. Tsvetkova, Junior Research Scientist of the Laboratory of Hydrology and Hydrochemistry of the Institute for Biology of Inland Waters Russian Academy of Sciences, Borok Yaroslavl; kistra@ibiw.yaroslavl.ru