

УДК 556.556.072

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ МЕЛКОВОДНОГО ВОДОЕМА: ОПЫТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

С.А. Кондратьев, М.В. Шмакова

Институт озероведения РАН, kondratyev@limno.org.ru

Для описания гидродинамики и транспорта наносов в мелководном водоеме использована математическая модель, основанная на совместном использовании уравнений мелкой воды и аналитической формулы расхода наносов. На примере мелководного озера Неро выполнены расчеты течений, переноса наносов и интенсивности переформирования дна в различных гидрометеорологических ситуациях. Проведены численные эксперименты с целью оценки возможных последствий реализации двух проектных решений, имеющих целью улучшение водообмена для оздоровления озера Неро.

Ключевые слова: водоем, моделирование, гидродинамика, наносы, течение, переформирование дна.

THE HYDRODYNAMIC REGIME OF A SHALLOW WATER BODY: EXPERIENCE OF MATHEMATICAL MODELING

S.A. Kondratyev, M.V. Shmakova

Institute of Limnology RAS

To describe hydrodynamics and sediment transport in a shallow water body, a mathematical model based on the combined use of the shallow water equations and the analytical formula for sediment discharge is used. On the example of the shallow Lake Nero, calculations of fluxes, sediment transport, and the intensity of bottom reorganization in various hydrometeorological situations were performed. Simulation modeling was conducted to assess the possible consequences of implementing of two design solutions aimed at improving of water exchange for sanitation of Lake Nero.

Keywords: lake, modeling, hydrodynamics, sediments, flow, bottom reshaping.

Введение

Математическое моделирование массопереноса в водоеме является эффективным инструментом исследования различного рода динамических процессов, происходящих как на поверхности, так и в толще водной массы. При этом натурные наблюдения за гидродинамикой часто являются труднодоступными и дорогостоящими, а иногда и невозможными. Современные моделирующие гидродинамические системы, как правило, реализуют комплексный подход к вычислению характеристик гидродинамического режима водного объекта с учетом ветрового воздействия, притоков и стоков, неоднородной структуры дна, турбулентного обмена и т.д. При дополнении модели гидродинамики водоема физически обоснованными уравнениями, описывающими транспорт наносов, открываются перспективы вычисления показателей динамики переформирования дна водных объектов, а также интенсивности их заиления.

Целью настоящей работы является оценка закономерностей и особенностей гидродинамического режима мелководного водоема с использованием 2D модели, а также проведение численных экспериментов по оценке его текущего и прогнозируемого состояния. Объектом исследования стало озеро Неро — крупнейшее озеро Ярославского Поволжья. В качестве прогнозных сценариев использованы два проекта по «восстановлению основных звеньев экологической цепи путем перевода водной экосистемы озера Неро из гиперэвтрофного состояния с массовым развитием фитопланктона и низкой прозрачностью воды к менее эвтрофному статусу с более высокой прозрачностью воды и распространением высшей водной растительности» [3, с. 20].

Объект исследования

Озеро Неро является зарегулированным водоемом. Средняя глубина озера составляет 1,5 м, площадь зеркала — около 54,5 км². Средний уклон дна озера равен 0,07°. Единственный сток из озера, река Векса, перегорожена плотиной у с. Богородицкое. Основными притоками в озеро являются реки Сара и Ишня, а также около 19 малых рек и ручьев. Общая площадь водосбора реки Сары составляет около 63 % площади водосбора всего озера. Средний годовой расход р. Сары за 1999—2011 гг. составил 3,41 м³/с, расход реки Ишня примерно в пять раз меньше.

Все зеркало озера бурно зарастает водной растительностью, которая, ежегодно отмирая и оседая на дно, способствует обмелению озера. Также на обмеление озера влияют и наносы, поступающие в озеро с притоками. Наиболее интенсивно озеро зарастает в южной части. В среднем относительная площадь, покрытая макрофитами, находится в пределах 20—25 % общей площади озера. Водная растительность в общем виде представлена гелофитами, гидрофитами с плавающими листьями и погруженными гидрофитами [1, с. 10].

Математическая модель

Оценка и прогноз течений и переноса речных наносов в озеро Неро выполнялись по двумерной модели течений и транспорта наносов в водоеме, разработанной в Институте озероведения РАН (Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2018615451). Эта модель основана на совместном решении уравнений мелкой воды в двумерной постановке и аналитической формулы расхода наносов [4, с. 62]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial(U^2/H)}{\partial x} + \frac{\partial(UV/H)}{\partial y} + gH \frac{\partial z}{\partial x} &= aV + c_a \frac{\rho_a}{\rho_b} W_x W + D \frac{\partial U^2}{\partial x^2} - g \frac{UV_{рез}}{C^2 H^2}, \\ \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial(UV/H)}{\partial x} + \frac{\partial(V^2/H)}{\partial y} + gH \frac{\partial z}{\partial y} &= -aU + c_a \frac{\rho_a}{\rho_b} W_y W + D \frac{\partial V^2}{\partial y^2} - g \frac{VV_{рез}}{C^2 H^2}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0,$$

$$G = \frac{\rho_{\text{гр}}}{\rho_{\text{гр}} - \rho_{\text{в}}} Q \left[\frac{c}{Hg} - (1-f)\rho_{\text{в}} I \right], \quad (2)$$

где t — время (с); x и y — координаты (м); U и V — полные потоки по координатным направлениям x и y соответственно ($\text{м}^2/\text{с}$); $V_{\text{рез}}$ — результирующий полный поток ($\text{м}^2/\text{с}$); h — невозмущенная глубина (м); z — уровень на свободной поверхности (м); $H = (h + z)$ — полная глубина (м); g — ускорение свободного падения ($\text{м}/\text{с}^2$); $a = 2\omega \sin\varphi$ — параметр Кориолиса; $\omega = 2\pi/\text{сут}$ — угловая скорость вращения Земли (рад/сут); φ — географическая широта (град.); C_a — безразмерный (б/р) коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности; ρ_a — плотность атмосферы ($\text{кг}/\text{м}^3$); W_x и W_y — компоненты составляющей скорости ветра по координатным направлениям x и y соответственно ($\text{м}/\text{с}$); W — результирующий вектор скорости ветра ($\text{м}/\text{с}$); C — коэффициент Шези ($\text{м}^{0.5}/\text{с}$); D — коэффициент горизонтального турбулентного обмена (б/р); $\rho_{\text{в}}$ и $\rho_{\text{гр}}$ — плотность воды и грунта ($\text{кг}/\text{м}^3$); $Q = BV_{\text{рез}}$ — расход воды в расчетной ячейке ($\text{м}^3/\text{с}$); I — уклон дна (б/р); f — коэффициент внутреннего трения (б/р); c — сцепление частиц грунта при сдвиге ($\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$); B — ширина расчетной ячейки (м).

Коэффициент Шези рассчитывается по формуле Маннинга: $C = H^{1/6}/n$, где n — параметр шероховатости (б/р). Граничные условия на твердых боковых границах для полных потоков заданы условиями поглощения: $U = 0$, $V = 0$. Уровень определяется из уравнения неразрывности. Граничные условия на открытых боковых границах заданы следующим образом: для стока — условия излучения, для источника — функция времени: $U = f_1(t, x, y)$, $V = f_2(t, x, y)$.

Совместное решение представленных выше уравнений мелкой воды и аналитической формулы расхода наносов позволяет вычислить изменения морфометрических характеристик ложа водохранилища.

Параметры формулы (2) оцениваются по данным гидрометрических наблюдений на притоках в водоем либо определяются по рекам-аналогам.

Уравнения мелкой воды (1) решаются полуявной конечно-разностной схемой: градиенты уровня и придонное трение аппроксимируются неявно, а адвективные члены, сила Кориолиса и горизонтальный турбулентный обмен — явно. Система уравнений (1) решается расщеплением по временному слою уравнений движения (уравнение для U на первом временном слое, уравнение для V на втором) и последующему решению их методом трехточечной прогонки по координатным направлениям. Уравнение неразрывности решается явно.

При изменении гидродинамических характеристик потока изменяется и его транспортирующий потенциал в отдельных ячейках. В зависимости от изменения транспортирующего потенциала соответствующая масса наносов или осаждается на дно, или, наоборот, вымывается с площади, характеризуемой размером ячейки. Так, масса осажденного на дно (или размытого) твердого вещества Δ (кг) в расчетной ячейке $[i, j]$ за период времени T рассчитывается по формуле

$$\Delta = \sum_{t=1}^T \left[G_{i,j}^{t-1} + k_{i-1,j} G_{i-1,j}^{t-1} + k_{i+1,j} G_{i+1,j}^{t-1} + k_{i,j-1} G_{i,j-1}^{t-1} + k_{i,j+1} G_{i,j+1}^{t-1} - G_{i,j}^t \right], \quad (3)$$

где t — индекс времени, k_{ij} — весовые коэффициенты проекции скоростей (б/р).

Весовые коэффициенты для каждой из четырех соседних ячеек рассчитываются следующим образом:

$$k_{i-1,j}^t = \begin{cases} 0 & \text{при } u_{i-1,j}^t \leq 0, \\ \frac{|u_{i-1,j}^t|}{v_{i-1,j}^t \text{ пез.}} & \text{при } u_{i-1,j}^t > 0, \end{cases} \quad k_{i+1,j}^t = \begin{cases} 0 & \text{при } u_{i+1,j}^t \geq 0, \\ \frac{|u_{i+1,j}^t|}{v_{i+1,j}^t \text{ пез.}} & \text{при } u_{i+1,j}^t < 0, \end{cases} \quad (4)$$

$$k_{i,j-1}^t = \begin{cases} 0 & \text{при } v_{i,j-1}^t \geq 0, \\ \frac{|v_{i,j-1}^t|}{v_{i,j-1}^t \text{ пез.}} & \text{при } v_{i,j-1}^t < 0, \end{cases} \quad k_{i,j+1}^t = \begin{cases} 0 & \text{при } v_{i,j+1}^t \leq 0, \\ \frac{|v_{i,j+1}^t|}{v_{i,j+1}^t \text{ пез.}} & \text{при } v_{i,j+1}^t > 0, \end{cases}$$

где u и v — проекции скорости потока по координатным направлениям x и y соответственно (м/с); $v_{\text{пез}}$ — равнодействующая скорости (м/с).

Слой аккумуляции или размыва (мм) рассчитывается по формуле

$$\delta = \Delta \frac{K}{\rho_{\text{сп}} S} \varphi, \quad (5)$$

где K — коэффициент размерности, равный 10^3 ; S — площадь расчетной ячейки (м^2); φ — плотность залегания грунта, для песка принимаемая равной 1,3 (б/р).

Результатом моделирования являются не только гидродинамические характеристики водной массы озера, но также изменения морфометрических характеристик ложа водохранилища за счет взыва, транспорта и переотложения наносов.

Для выполнения гидродинамического моделирования в акватории назначено 5417 расчетных точек. Шаг по времени составил 2 с, по пространству — 100 м. В соответствии со схемой распределения растительности, приведенной в работе [1, с. 10], для некоторых расчетных точек были назначены коэффициенты шероховатости, значения которых были приняты согласно рекомендациям И.Ф. Карасева: для гелофитов и погруженных гидрофитов $n = 0,14$, для плавающих гидрофитов $n = 0,2$ [2, с. 119].

Регулярных наблюдений за расходами наносов как на самом озере, так и на его притоках не проводится. Поэтому для оценки параметров аналитической формулы расхода наносов (2) были выбраны реки-аналоги со сходным гидравлическим режимом, расположенные в схожих физико-географических условиях, на которых проводились наблюдения за твердым стоком.

В табл. 1 приведен список рек, их характеристики и коэффициенты корреляции $r_{\text{Сара}}$ суточных расходов воды водотоков, выбранных в качестве возможных рек-аналогов для реки Сары. Расчеты проводились для периода 2008—2013 гг. Наиболее тесная связь суточных расходов воды наблюдается для рек Которосль и Соть. По водности и среднему уклону водотока к реке Саре наиболее близка река

Соть, а по внутригодовой изменчивости (C_v) — река Которосль. Однако для калибровки параметров формулы расхода наносов соответствие водности реки имеет значительно большее значение, чем соответствие внутригодовой изменчивости. Поэтому в качестве реки-аналога для расчета расхода наносов реки Сары принята река Соть.

Таблица 1

Характеристики реки Сары и ее возможных аналогов

| Название водного объекта | Расстояние от устья, км | Площадь водосбора, км ² | Уклон, ‰ | $Q_{ср,сут}^2$, м ³ /с | C_v | $r_{Сара}$ |
|------------------------------|-------------------------|------------------------------------|----------|------------------------------------|-------|------------|
| р. Урдома, с. Белянтино | 4,8 | 345 | 2,1 | 3,14 | 3,16 | 0,74 |
| р. Которосль, г. Гаврилов Ям | 79,0 | 4980 | 0,3 | 35,02 | 1,32 | 0,83 |
| р. Соть, д. Верхний Жар | 59,0 | 683 | 1,1 | 5,98 | 2,9 | 0,84 |
| р. Сара, пгт. Петровское | 31,0 | 482 | 1,3 | 3,66 | 1,31 | — |

В табл. 2 приведены наблюдаемые расходы воды и наносов по данным, представленным в Гидрологическом ежегоднике (т. 4, вып. 1 — 4, 1972, 1973 и 1974 гг.) и расходы наносов, рассчитанные по аналитической формуле. Среднее относительное отклонение между рассчитанными ($G_{рас}$) и наблюдаемыми ($G_{набл}$) расходами наносов реки Соть, д. Верхний Жар, составило 74 %.

Таблица 2

Наблюдаемые расходы воды и наносов ($G_{набл}$) и расходы наносов, рассчитанные по аналитической формуле ($G_{рас}$)

| Q , м ³ /с | h , м | $G_{набл}$, кг/с | $G_{рас}$, кг/с | σ , % |
|-------------------------|---------|-------------------|------------------|--------------|
| 54,4 | 2,5 | 1,4 | 1,52 | 9 |
| 35,2 | 2,03 | 0,82 | 0,99 | 20 |
| 13,1 | 1,32 | 0,11 | 0,37 | 233 |
| 57,2 | 2,65 | 1,9 | 1,60 | 19 |
| 29,6 | 1,87 | 0,45 | 0,83 | 84 |
| 31 | 1,94 | 1,28 | 0,87 | 48 |
| 27,9 | 1,85 | 0,55 | 0,78 | 42 |
| 26,3 | 1,80 | 0,31 | 0,74 | 137 |

На рис. 1 приведены зависимости между наблюдаемыми и рассчитанными расходами наносов реки Сары для периода половодья.

На основе проведенной оценки параметров аналитической формулы расхода наносов (2) для разных периодов водности были приняты их следующие значения: $c = 0$ кг/(м·с²); $f = 1,016$.

Результаты расчетов

На рис. 2 приведены карта глубин и план течений на поверхности акватории озера Неро при стационарном режиме расчета. На рис. 3 представлено распределение скорости течений для разных периодов водности. В целом значения скорости течения воды в акватории крайне невелики и не превышают нескольких

миллиметров в секунду. Максимальные значения скорости (несколько сантиметров в секунду) приходятся на места впадения основных притоков и исток реки Вексы, а также участок транзитного движения водных масс между притоками и рекой Вексой.

Очевидно, что водность притоков оказывает непосредственное воздействие на распределение и значения скорости течений, расходов наносов в акватории и

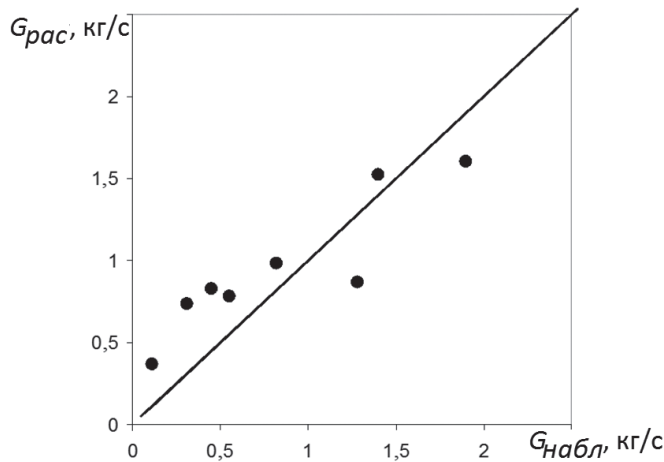


Рис. 1. Наблюдаемые ($G_{набл}$) и рассчитанные ($G_{рас}$) расходы наносов реки Соть, д. Верхний Жар.

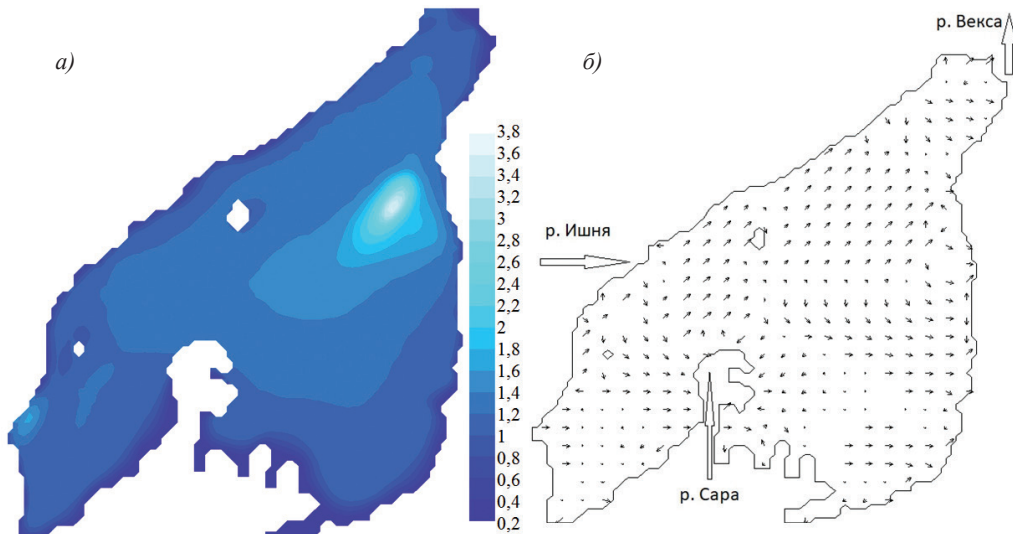


Рис. 2. Карта глубин (а) и плановая схема течений (б) на поверхности акватории озера Неро при стационарном режиме расчета при расходе воды реки Сары $6,7 \text{ м}^3/\text{с}$.

переформирование дна озера. Более интенсивная циркуляция водных масс и твердого вещества приходится на весеннее половодье. В этот период увеличиваются как средние значения скорости течения и расходов наносов в акватории, так и территории охвата водоема этой циркуляцией.

На рис. 4 представлено распределение расхода наносов (кг/с) в акватории озера Неро для периодов с разной водностью. Распределение расхода наносов повторяет распределение скорости течения. Наибольшие значения расхода наносов приходятся на участки повышенной скорости течения (впадения рек Сары и Ишня и место руслового сужения — река Векса) и участок транзитного переноса твердого вещества через акваторию от устья впадающих рек до истока Вексы. Значения расходов наносов незначительны и не превышают нескольких граммов в секунду. Это объясняется крайне малыми значениями скорости течения.

Особенности морфометрии озера Неро, взаимное расположение притоков и стока способствуют неравномерному распределению поступивших с притоками

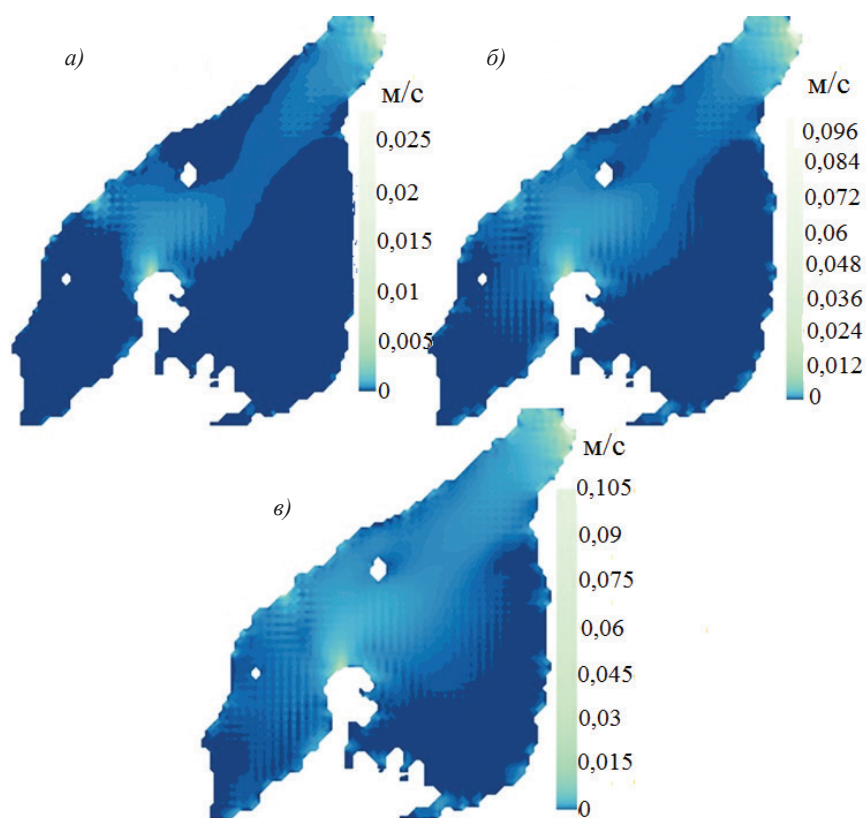


Рис. 3. Распределение скорости течений в акватории озера Неро при разных значениях расхода реки Сары.

а) 1,7 м³/с, *б)* 3,7 м³/с, *в)* 6,7 м³/с.

речных наносов. Это оказывает влияние на значения расходов наносов и на неравномерное переформирование дна озера. Очевидно, что распределение речных наносов определяется течениями притоков, наиболее выраженными в западной и южной частях водоема. Наибольшая рассчитанная интенсивность донных переотложений приходится, как и на рис. 4, на места впадения притоков и участки транзитного переноса наносов. Для расхода реки Сары, равного $6,7 \text{ м}^3/\text{с}$, она составляет около 15 мм за декаду.

Из рис. 4 видно, что переформирование дна поступающими из притоков речными наносами незначительно по интенсивности и охватывает лишь пути транзитного перемещения наносов. Это вызвано малой скоростью течения воды и вследствие этого слабой циркуляцией водных масс в акватории. Однако, поскольку глубина водоема невелика, на перераспределение поступающих в водоем речных наносов значительное влияние оказывает ветровое перемешивание.

В среднем по акватории за год, согласно результатам расчетов по модели, заиление речными наносами двух притоков — рек Ишня и Сары — составляет около $0,5 \text{ мм}$ в год, что не противоречит данным прежних исследований [1, с. 37].

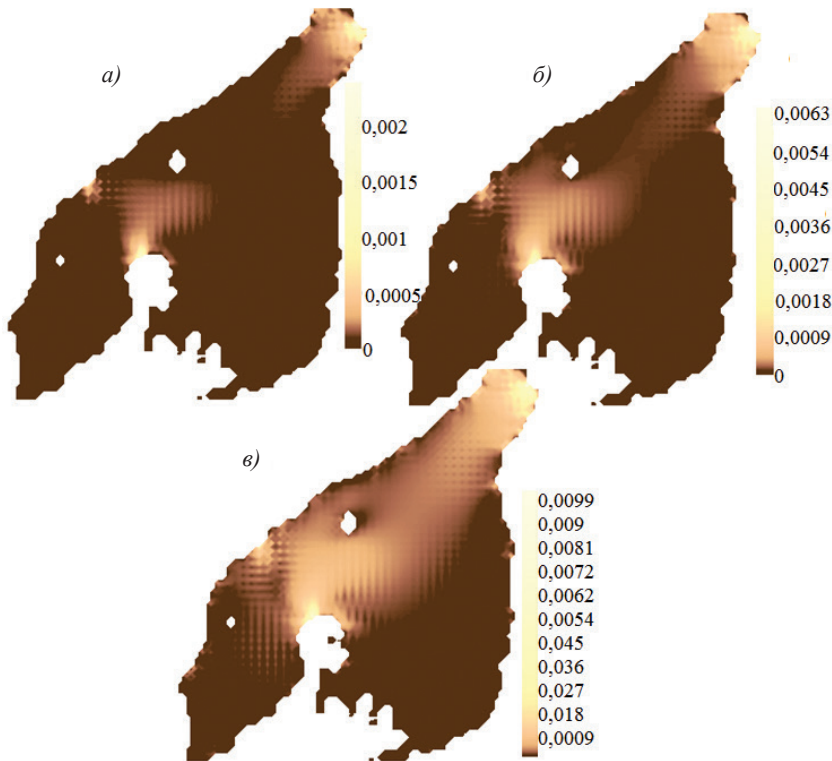


Рис. 4. Схема распределения расхода наносов в акватории озера Неро при разных значениях расхода реки Сары.

а) $1,7 \text{ м}^3/\text{с}$, б) $3,7 \text{ м}^3/\text{с}$, в) $6,7 \text{ м}^3/\text{с}$.

На рис. 5 и 6 приведена плановая схема течений и расхода наносов при задании постоянного по направлению и скорости ветра и расходе реки Сары, равном $6,7 \text{ м}^3/\text{с}$. Для численного эксперимента были выбраны два доминирующих

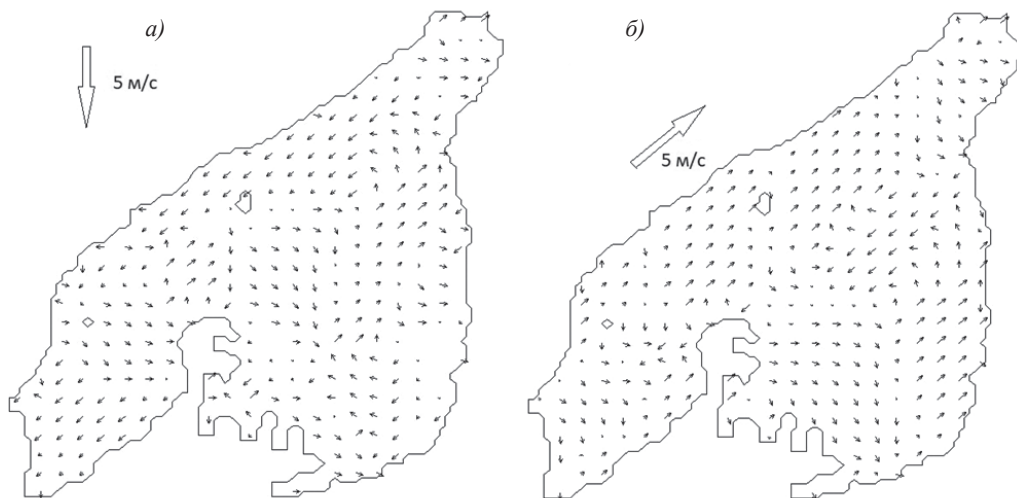


Рис. 5. Плановая схема течений на поверхности акватории озера Неро при стационарном режиме расчета и скорости ветра 5 м/с .
а — северный ветер, *б* — юго-западный ветер.

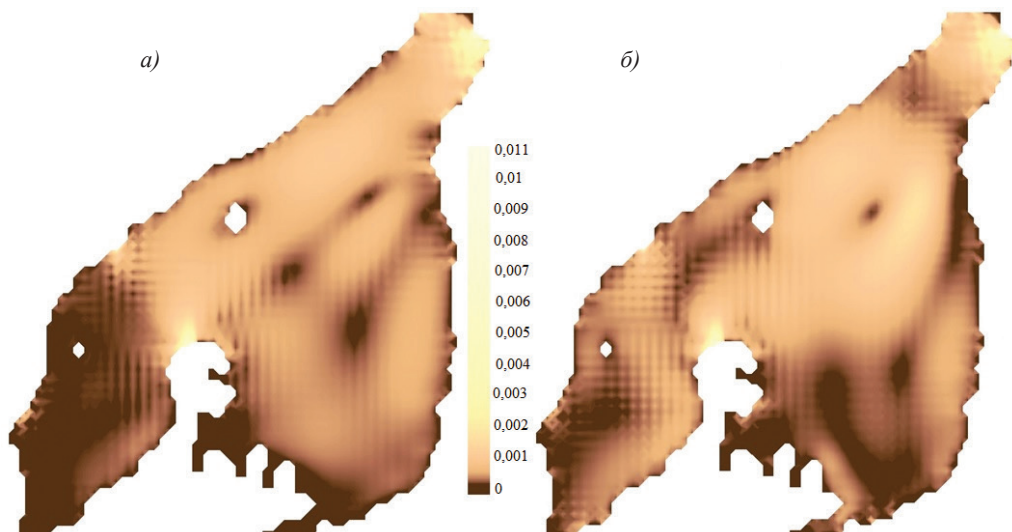


Рис. 6. Распределение расхода наносов (кг/с) в акватории озера Неро при расходе воды реки Сары $6,7 \text{ м}^3/\text{с}$ и скорости ветра 5 м/с .
а — северный ветер, *б* — юго-западный ветер.

в летний период направления ветра — северное и юго-западное — при постоянной скорости ветра 5,0 м/с [1, с. 14]. Согласно данным наблюдений за плановой схемой течений в озере, так же как и по результатам математического моделирования, проведенного другими исследователями [1, с. 40], при ветре северных направлений у западного берега формируется циклонический круговорот воды (против часовой стрелки), у восточного — антициклонический. При ветре южных направлений положение круговоротов остается прежним, но направление циркуляции изменяется на противоположное.

Более активная циркуляция водных масс при указанных ветрах приводит к изменению циркуляции и твердого вещества в акватории. Почти во всех частях озера происходит взмучивание донных отложений, однако значение расхода наносов остается в пределах нескольких десятков граммов в секунду.

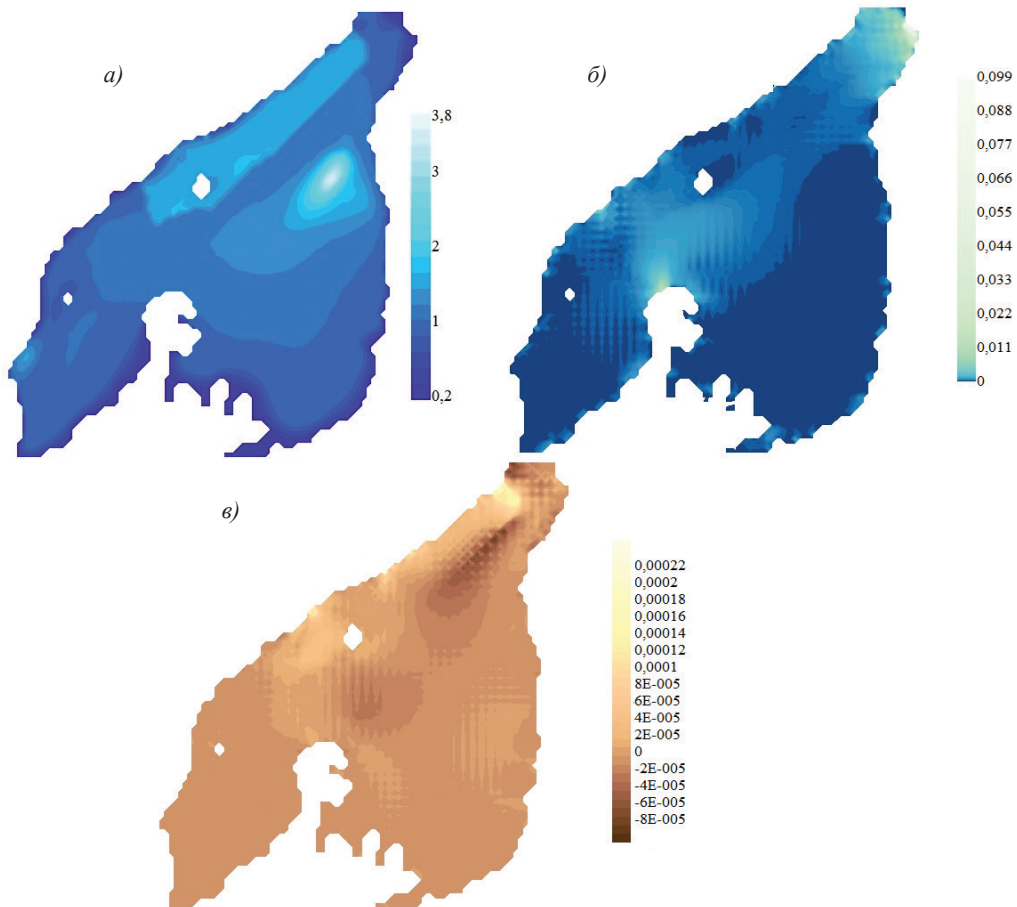


Рис. 7. Карта глубины озера Неро для первого численного эксперимента (а), распределение скорости течения в акватории озера Неро (б) и распределение разности ($G_{ч.з.} - G$) расхода наносов (в).

С использованием представленной модели были проведены численные эксперименты с целью оценки полей течений при реализации двух проектных решений для улучшения водообмена и оздоровления озера Неро. Расчеты выполнялись для периода средней водности, что соответствует расходу реки Сары $3,7 \text{ м}^3/\text{с}$.

Первое проектное решение [3, с. 6] предполагало расчистку дна озера в черте города Ростова и выемку донного грунта. При выполнении расчетов исходные значения глубины были скорректированы согласно этому проекту. На северо-западном участке акватории в прибрежной части глубина была увеличена на $0,5 \text{ м}$. На рис. 7 приведены значения глубины, распределение скорости течения и распределение разности значений расхода наносов ($G_{\text{ч.э.}}$ — G), полученных при численном эксперименте ($G_{\text{ч.э.}}$) и при естественном режиме (G) в акватории озера Неро.

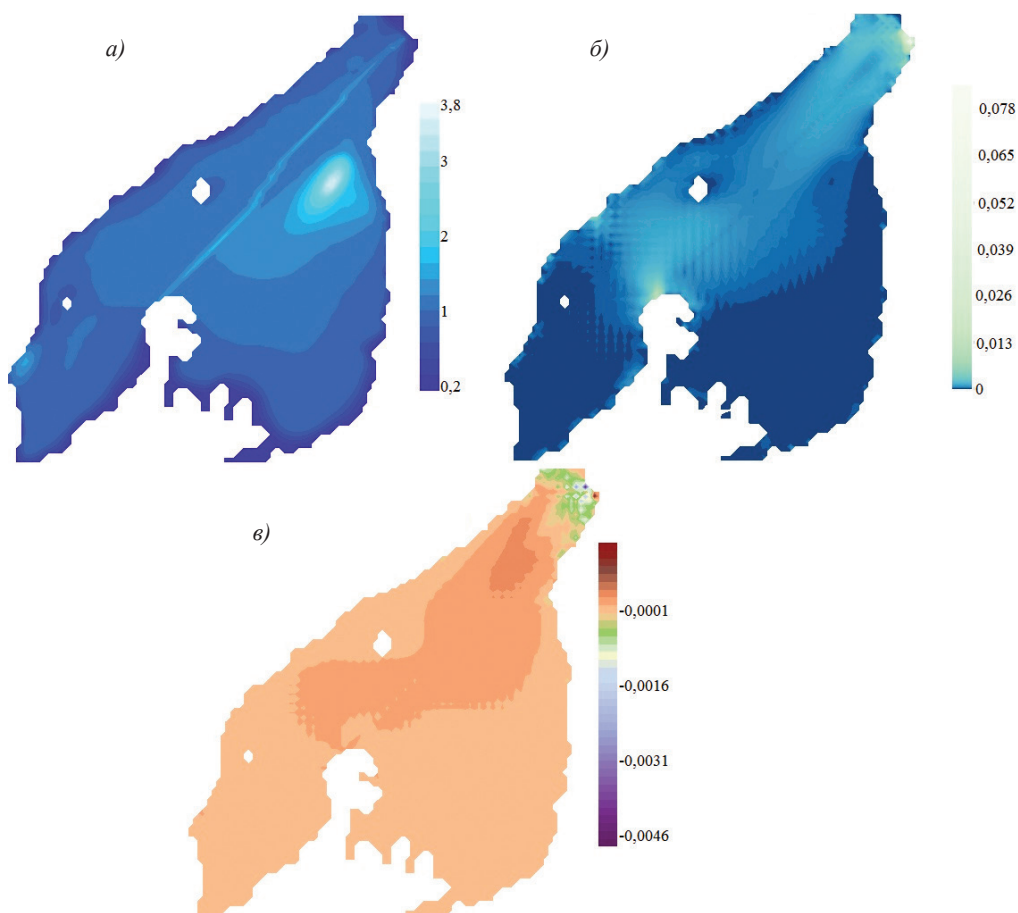


Рис. 8. Карта глубины озера Неро для второго численного эксперимента (а); распределение скорости течения в акватории озера Неро (б) и распределение разности ($G_{\text{ч.э.}}$ — G) расхода наносов (в).

Как и следовало ожидать, для участка акватории с углубленным дном скорость течения уменьшается в несколько раз (в некоторых областях до нулевых значений). При этом расход наносов за счет увеличения площади поперечного сечения незначительно возрастает непосредственно на участке углубления, в то время как на продольной границе этого участка с нетронутой областью значения расхода наносов уменьшаются. Это вызвано уменьшением скорости течения на этом участке.

Второе проектное предложение направлено на увеличение транзитной способности продольного участка акватории от устья реки Сары до истока реки Вексы. Таким образом, для второго численного эксперимента на указанном участке был назначен канал с соответствующим увеличением глубины на всем протяжении на 0,5 м. На рис. 8 приведены значения глубины, распределение скорости течения и распределение разности значений расхода наносов ($G_{ч.э.} - G$), полученных при численном эксперименте и при естественном режиме в акватории озера Неро.

Очевидно, что увеличение глубины при сохранении переносимых водных масс приведет к уменьшению скорости течения, что иллюстрирует распределение течений на рис. 8. В результате уменьшения скорости течения произойдет и незначительное (на несколько граммов в секунду) уменьшение расхода наносов (см. рис. 8).

Заключение

На основе анализа результатов моделирования можно сделать следующие выводы, касающиеся особенностей и закономерностей процесса массопереноса в озере Неро.

- Особенности морфометрии озера, расположение притоков и стока относительно друг друга способствуют неравномерному распределению поступивших с притоками речных наносов. Это отражается как на значениях расхода наносов, так и на интенсивности переформирования дна. Процессы взмыва, переноса и отложения речных наносов по акватории, зависящие от скорости течения, наиболее выражены в центральной и северной части водоема.

- Средние значения скорости течения и расхода наносов в период межени по акватории составляют около 0,2 мм/с и 0,067 г/с соответственно, в период средней водности — 0,5 мм/с и 0,125 г/с, в период половодья — 0,9 мм/с и 0,224 г/с. На пути транзита от основного притока (река Сара) до стока из озера (река Векса) средние значения скорости течения и расхода наносов составляют в период межени около 0,2—2,5 мм/с и 0,074—1 г/с соответственно, в период средней водности 0,2—3,3 мм/с и 0,1—3,0 г/с, в период половодья 0,8—80 мм/с и 0,2—5 г/с.

- Интенсивность процессов переформирования дна речными наносами также изменяется в течение года. Интенсивный процесс аккумуляции речных наносов приходится на период спада половодья, когда скорость течения начинает

снижаться и транспортирующий потенциал потока уменьшается, что приводит к осаждению наносов. В среднем по акватории за год, согласно результатам расчетов по модели, заиление речными наносами двух притоков — рек Ишня и Сара — составляет около 0,5 мм/год, максимальные значения достигают 1,5—2,0 мм/год в районе впадения реки Сары.

- Сравнение результатов расчета гидродинамики и транспорта наносов озера Неро без учета влияния макрофитов и при их наличии показало, что водная растительность существенно влияет на интенсивность и характер циркуляции водных масс и твердого вещества в акватории. Скорость течения на участках, занятых макрофитами, составляет не более 5—10 % значений скорости течения на открытых участках. Задерживаясь в местах скопления макрофитов (т.е. в местах с повышенным значением шероховатости дна), часть наносов осаждается, в результате чего уменьшается глубина. Уменьшение глубины, в свою очередь, приводит к лучшему прогреванию толщи воды и появлению более благоприятных условий для произрастания макрофитов.

С использованием разработанной в Институте озераведения РАН модели проведены численные эксперименты по оценке возможных последствий реализации двух проектных решений, цель которых состоит в улучшении водообмена и оздоровления озера Неро. Согласно первому решению, планировалась выемка донных отложений в пределах городской черты города Ростова с целью увеличения глубины в прибрежной зоне озера. Как и следовало ожидать, расчеты показали, что для участка акватории с углубленным дном скорость течения уменьшается в несколько раз (в некоторых областях до нулевых значений). При этом расход наносов за счет увеличения площади поперечного сечения потока незначительно возрастает непосредственно на участке углубления. Таким образом, никакого положительного эффекта в результате предложенных действий не последует.

Второе проектное предложение предполагало увеличение транзитной способности продольного участка акватории от устья основного притока реки Сары до истока реки Вексы. Расчеты показали, что увеличение глубины на указанной траектории при сохранении переносимых водных масс также приведет к уменьшению скорости течений.

На основании результатов проведенного моделирования можно сделать вывод о том, что практическая реализация представленных проектных решений не только не приведет к улучшению водообмена в озере, но, наоборот, будет способствовать образованию застойных зон (особенно реализация первого проектного решения).

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № 0154-2018-0003 (№ гос. регистрации: № 01201363379) при частичном финансовом обеспечении за счет средств федерального бюджета.

Список литературы

1. *Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Литвинов А.С., Поддубный С.А.* Гидрология и гидрохимия озера Неро. Рыбинск: Рыбинский дом печати, 2003. 192 с.
2. *Карасев И.Ф.* Русловые процессы при переброске стока. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 288 с.
3. Комплексная экологическая реабилитация озера Неро в Ростовском районе Ярославской области. Проектная документация. Раздел 1. Пояснительная записка. ООО Форватер, 2014. 50 с.
4. *Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Маркова Е.Г.* Пространственно-временные закономерности заиления водохранилища Сестрорецкий Разлив речными наносами (по результатам математического моделирования) // УЗ РГГМУ. 2016. № 44. С. 61—69.