

АБИОТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ОЗЕРА НЕРО ПО ДАННЫМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ. 2. ДВУХФАЗНЫЙ МАССООБМЕН В АКВАТОРИИ

Ш. Р. Поздняков, С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова

Институт озераведения РАН,

196105, Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9, e-mail: tbgmaster@mail.ru

Поступила в редакцию 5.08.2020

Для мелководного оз. Неро выполнены расчеты течений, переноса наносов и интенсивности переформирования дна в различных гидрометеорологических ситуациях. Вычисления проводились по двумерной модели течений и транспорта наносов в мелководном водоеме и аналитической формуле расхода наносов, разработанных в Институте озераведения РАН. Проведены численные эксперименты с целью оценки возможных последствий реализации двух проектных решений, имеющих целью улучшение водообмена для оздоровления оз. Неро. Согласно первому решению планировалась выемка донных отложений в пределах городской черты г. Ростова с целью увеличения глубин в прибрежной зоне озера. Расчеты показали, что для участка акватории с углубленным дном скорости течения уменьшаются в несколько раз (в некоторых областях до нулевых значений). Расход наносов незначительно вырастет непосредственно на участке углубления за счет увеличения площади поперечного сечения потока. То есть никакого положительного эффекта это мероприятие не принесет. Второе проектное предложение должно быть направлено на увеличение транзитной способности продольного участка акватории от устья основного притока р. Сары до истока р. Вексы. Расчеты показали, что увеличение глубины на указанной траектории при сохранении переносимого количества водных масс также приведет к уменьшению скорости течений. На основании проведенного моделирования, можно сделать вывод, что практические реализации представленных проектных решений не только не приведут к улучшению водообмена в озере, но и наоборот, будут способствовать образованию застойных зон, особенно для первого предложенного проектного решения.

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

DOI: 10.47021/0320-3557-2020-28-37

ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование массо-переноса в водоеме является эффективным инструментом исследования различного рода гидродинамических процессов, происходящих как на поверхности, так и в толще акватории. При этом натурные наблюдения за гидродинамикой часто труднодоступны и дорогостоящие, а часто и невозможны. Современные моделирующие гидродинамические системы, как правило, реализуют комплексный подход к вычислению гидродинамического режима водного объекта с учетом ветрового воздействия, притоков и стоков, неоднородности подстилающей поверхности, турбулентного обмена, и т.д. При дополнении основной расчетной модели физически обоснованными уравнениями для расчета расхода наносов открываются перспективы вычисления динамики переформирования дна водных объектов, а также интенсивности их заиления. Представленная в данной работе двумерная модель гидродина-

мики и транспорта наносов в водоеме *IL_MTLake*, основанная на уравнениях мелкой воды и аналитической формуле расхода наносов, позволяет решать описанный выше круг задач для акватории оз. Неро.

Целью настоящей работы является оценка закономерностей и особенностей гидродинамического режима мелководного водоема с использованием 2D модели, а также проведение численных экспериментов по оценке текущего и прогнозного его состояния. В качестве прогнозных сценариев использованы два проекта по “восстановлению основных звеньев экологической цепи путем перевода водной экосистемы оз. 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” [Комплексная..., 2014 (Kompleksnaya ..., 2014)].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Двумерная модель течений и транспорта наносов в мелководном водоеме *IL_MTLake* – *Institute of Limnology model of Mass Transport in shallow Lake* (Свидетельство о государственной

регистрации №2018615451 от 08.05.2018) разработана в Институте озераведения РАН на основе отечественного и зарубежного опыта моделирования течений и переноса примесей в водоемах

[Кондратьев, Шмакова, 2019 (Kondratyev, Shmakova, 2019); Blumberg, Mellor, 1987; Jørgensen, 1994; 2008; Hutter et al., 2011]. Модель основана на совместном решении уравнений мелкой воды в двумерной постановке [Филатов, 1983 (Filatov, 1983); Рахуба, 2012 (Rakhuba, 2012)] и аналитической формулы расхода наносов [Шмакова, 2018 (Shmakova, 2018)], что позволяет вычислить изменения морфометрических характеристик ложа водохранилища. Параметры аналитической формулы расхода наносов оцениваются по данным гидрометрических наблюдений на притоках в водоем либо определяются по ре-

кам-аналогам. Расчет переформирования дна водоема рассчитывается из соображений того, что при изменении гидродинамических характеристик потока меняется 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. Слой аккумуляции или размыва, мм рассчитывается по формуле, рекомендуемой в [Рекомендации..., 2006 (Rekomendacii..., 2006)].

МАТЕРИАЛЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основе представленной выше двумерной модели гидродинамики и транспорта наносов в водоеме [Кондратьев, Шмакова, 2019 (Kondrat'ev, Shmakova, 2019)] выполнено подробное модельное исследование заиления мелководного оз. Неро. Средняя глубина озера – 1.5 м, площадь зеркала около 54.5 км². Средний уклон дна озера составляет 0.07°. Озеро Неро является зарегулированным водоемом – единственный сток из озера – р. Векса – перегороджена плотиной у с. Богородицкое. Основными притоками в озеро являются реки Сара и Ишня, а также около 19 рек и ручьев. Общая площадь водосбора р. Сара составляет около 63%: площади водосбора озера. Средний годовой расход р. Сара за 1999–2011 гг. равен 3.41 м³/с, расход р. Ишня примерно в пять раз меньше.

На всем протяжении озеро 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% от общей площади озера. Водная растительность в общем виде представлена гелофитами, гидрофитами с плавающими листьями и погруженными гидрофитами [Бикбулатов, 2003 (Bikbulatov, 2003)].

Всего в акватории оз. Неро назначено 5417 расчетных точек. Шаг по времени составил 2 с, по пространству – 100 м. На стационарный режим расчета при $U=const$, $V=const$ модель выходит примерно через 30 тыс. расчетных шагов по времени.

В соответствии со схемой распределения растительности, приведенной в [Бикбулатов, 2003 (Bikbulatov, 2003)], 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 $n = 0.2$).

Регулярных наблюдений за расходами наносов на притоках оз. Неро не проводится. Поэтому, для калибровки параметров аналитической формулы расхода наносов были выбраны реки – аналоги со сходным гидравлическим режимом, расположенные в схожих физико-географических условиях, на которых проводятся относительно регулярные наблюдения за твердым стоком.

В табл. 1 приведен список рек, их характеристики и коэффициенты корреляции $r_{Cара}$ суточных расходов воды водотоков, выбранных в качестве возможных рек – аналогов для р. Сара. Расчеты проводились для периода 2008–2013 гг. Наиболее тесная связь суточных расходов воды наблюдается для рек Которость и Соть. По водности и среднему уклону водотока к р. Сара наиболее близка р. Соть, а по внутригодовой изменчивости (C_v) – р. Которость. 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 р. Сара принята р. Соть.

Для расчета расхода наносов по аналитической формуле расхода наносов для разных периодов водности были приняты следующие значения параметров $c = 0$ кг/(м·с²); $f = 1.016$. В табл. 2 приведены наблюдаемые расходы воды и наносов [Гидрологический..., 1972; 1973; 1974 (Gidrologicheskij..., 1972; 1973; 1974)] и рассчитанные по формуле расходы наносов. Среднее относительное отклонение между рассчитанными $G_{рас}$ и наблюдаемыми $G_{набл}$ расходами наносов р. Соть – д. Верхний Жар составило 74% (рис. 1).

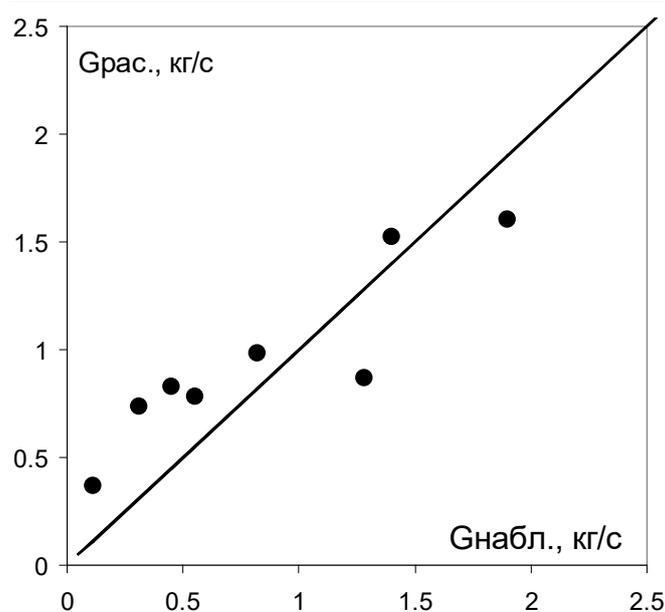
На рис. 1 приведены зависимости между наблюдаемыми и рассчитанными расходами наносов реки Сара для периода половодья.

Таблица 1. Характеристики р. Сары и ее возможных аналогов**Table 1.** Characteristics of River Sara and its possible analogues

Название водного объекта Name of the water body	Расстояние от устья, км Distance from the mouth, km	$F_{водб}$, км ²	I , ‰/‰	$Q_{ср,сут}$, м ³ /с	C_v	$r_{Сара}$
р. Урдома – с. Белятино	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	–

Таблица 2. Наблюдаемые расходы воды Q и наносов $G_{набл}$, а также результаты расчетов по аналитической формуле расхода наносов $G_{рас}$.**Table 2.** Observed discharge of water Q and sediment $G_{набл}$ as well as the results of calculations using the analytical formula for sediment discharge $G_{рас}$

Q , м ³ /с	h , м	$G_{набл}$, кг/с	$G_{рас}$, кг/с	σ , %
54.4	2.5	1.4	1.52	0.09
35.2	2.03	0.82	0.99	0.20
13.1	1.32	0.11	0.37	2.33
57.2	2.65	1.9	1.60	0.19
29.6	1.87	0.45	0.83	0.84
31	1.94	1.28	0.87	0.48
27.9	1.85	0.55	0.78	0.42
26.3	1.80	0.31	0.74	1.37

**Рис. 1.** Наблюдаемые и рассчитанные расходы наносов, кг/с, р. Соть – д. Верхний Жар.**Fig 1.** Observed and calculated sediment discharge, kg/s, Sot River – vil. Verkhniy Zhar.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЯ

На рис. 2 и 3 приведены карта глубин и рассчитанная плановая схема течений в акватории оз. Неро при стационарном режиме расчета. На рис. 4 представлено распределение скоростей течений для разных периодов водности. В целом, значения скорости течения воды в акватории невелики и не превышают несколько миллиметров в секунду. Максимальные значения скорости (несколько сантиметров в секунду) приходятся на места впадения основных притоков и исток р. Векса, а также участок тран-

зитного движения водных масс между притоками и р. Векса.

Очевидно, что водность притоков оказывает непосредственное воздействие на распределение и значения скоростей течений, расходов наносов в акватории и переформирование дна озера. Более интенсивная циркуляция водных масс и твердого вещества приходится на весеннее половодье. В этот период увеличиваются как значения средних скоростей течения и расходов наносов в акватории, так и территории охвата водоема этой циркуляцией.

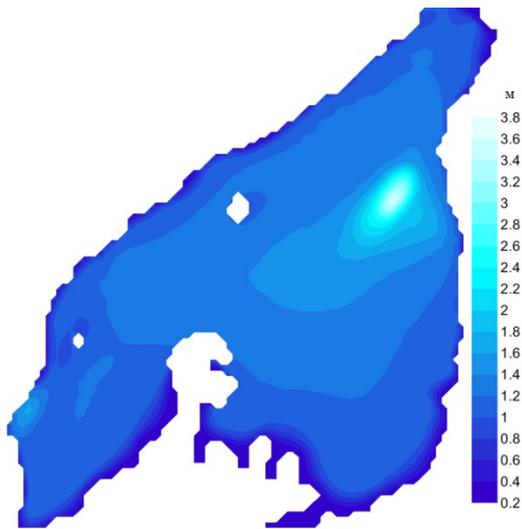


Рис. 2. Карта глубин оз. Неро.

Fig. 2. Map of the depths of Lake Nero.

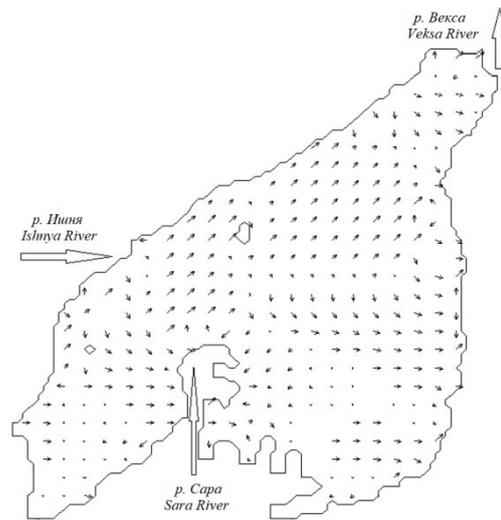


Рис. 3. Плановая схема течений на поверхности акватории оз. Неро при стационарном режиме расчета при расходе воды р. Сара $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$.

Fig. 3. Scheme of stationary currents in Lake Nero, water discharge of River Sara – $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$.

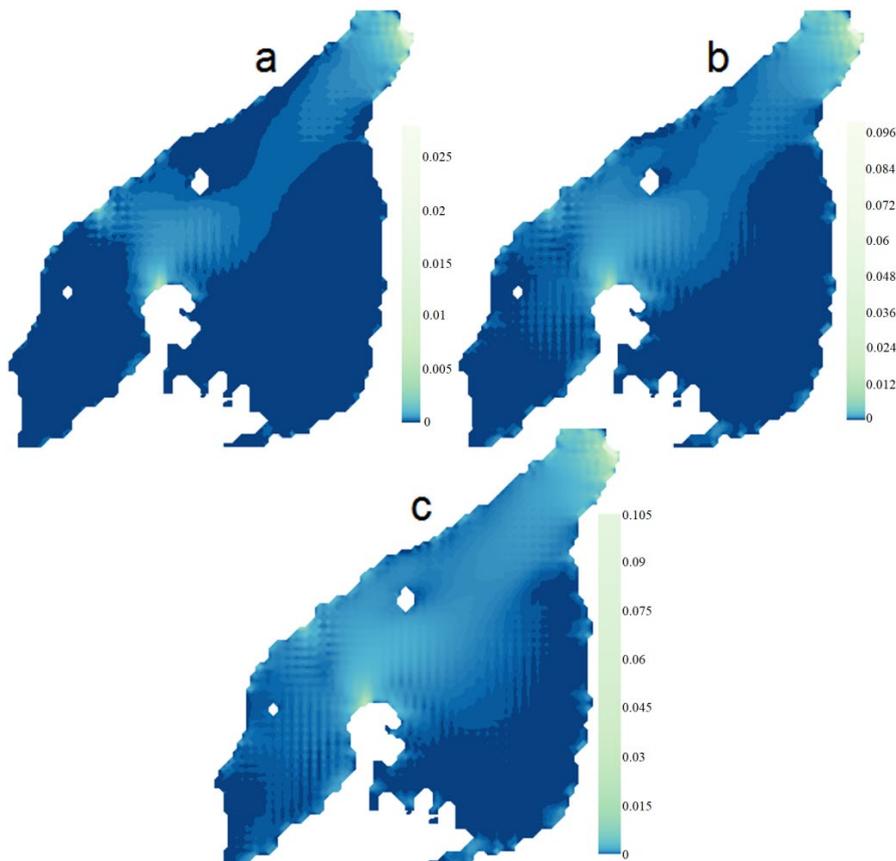


Рис. 4. Распределение скоростей течений (м/с) в акватории оз. Неро при расходе р. Сара $1.7 \text{ м}^3/\text{с}$ (а), $3.7 \text{ м}^3/\text{с}$ (b), $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$ (с).

Fig. 4. Distribution of current velocities (m/s) in the aquatic area of Lake Nero, water discharge of River Sara – $1.7 \text{ м}^3/\text{с}$ (a), $3.7 \text{ м}^3/\text{с}$ (b), $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$ (c).

На рис. 5 представлено распределение расхода наносов (кг/с) в акватории оз. Неро для разных периодов водности. Распределение

расхода наносов повторяет распределение скоростей течения. Наибольшие значения расхода наносов приходятся на участки повышенной

скорости воды (впадения рек Сара и Ишня и место руслового сужения – р. Векса) и участок транзитного переноса твердого вещества через акваторию от устья впадающих рек до истока р. Вексы. Значения расходов наносов невелики и не превышают нескольких грамм в секунду. Это объясняется крайне малыми скоростями течения.

Особенности морфометрии оз. Неро, расположение притоков и стока относительно друг друга способствуют неравномерному распределению поступивших с притоками речных наносов. Последнее влияет на значения расходов наносов и на неравномерное переформирования дна озера. Очевидно, что распределение речных наносов

определяется течениями притоков, наиболее выраженными в западной и южной частях водоема. Расчеты показали, что наибольшая интенсивность донных переотложений наносов приходится на места впадения притоков и участки транзитного переноса наносов. Переформирование дна поступающими из притоков речными наносами невелико по интенсивности и охватывает лишь пути транзитного перемещения наносов. Это вызвано малыми значениями скорости воды и, как следствие, слабой циркуляцией водных масс в акватории. Однако, учитывая небольшую глубину водоема, на перераспределение поступающих в водоем речных наносов значительное влияние оказывает ветровое перемешивание.

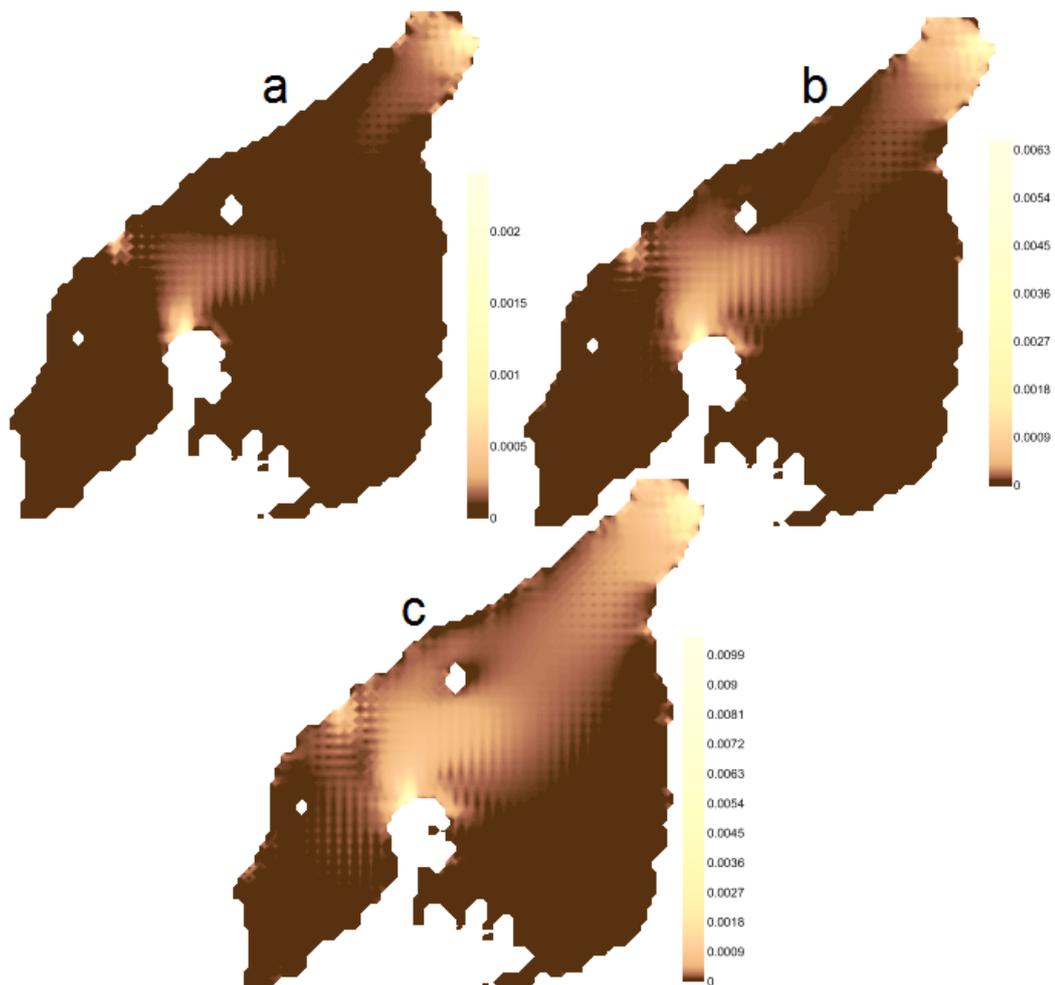


Рис. 5. Схема распределения расхода наносов (кг/с) в акватории оз. Неро при расходе р. Сара $1.7 \text{ м}^3/\text{с}$ (а), $3.7 \text{ м}^3/\text{с}$ (б), $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$ (с).

Fig. 5. Distribution of sediment discharge (kg / s) in the aquatic area of Lake Nero, water discharge of River Sara – $1.7 \text{ м}^3/\text{с}$ (a), $3.7 \text{ м}^3/\text{с}$ (b), $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$ (c).

В среднем по акватории за год согласно расчетам по модели заилиение речными наносами двух притоков – рек Ишня и Сара – составляет около 0.5 мм в год, что не противоречит данным прежних исследований [Бикбулатов, 2003 (Bikbulatov, 2003)].

На рис. 6 приведены карты расхода наносов при задании постоянного по направлению и скорости ветра при расходе р. Сара $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$. Для численного эксперимента выбраны два доминирующих в летний период направление ветра – северное и юго-западное, при постоян-

ной скорости 5.0 м/с [Бикбулатов, 2003 (Bikbulatov, 2003)]. Согласно данным наблюдений за планом течений в озере, так и по результатам математического моделирования, проведенного другими исследователями [Бикбулатов, 2003 (Bikbulatov, 2003)] при ветре северных направлений у западного берега формируется циклонический круговорот воды (против часовой стрелки), у восточного – антициклонический. При ветрах южных направлений положение

круговоротов остается прежним за изменением направлений на противоположные.

Более активная циркуляция водных масс при указанных ветрах приводит к изменению циркуляции и твердого вещества в акватории (рис. 6). Почти во всех частях озера происходит взмучивание донных отложений, однако значение расхода наносов остается в пределах нескольких десятков грамм в секунду.

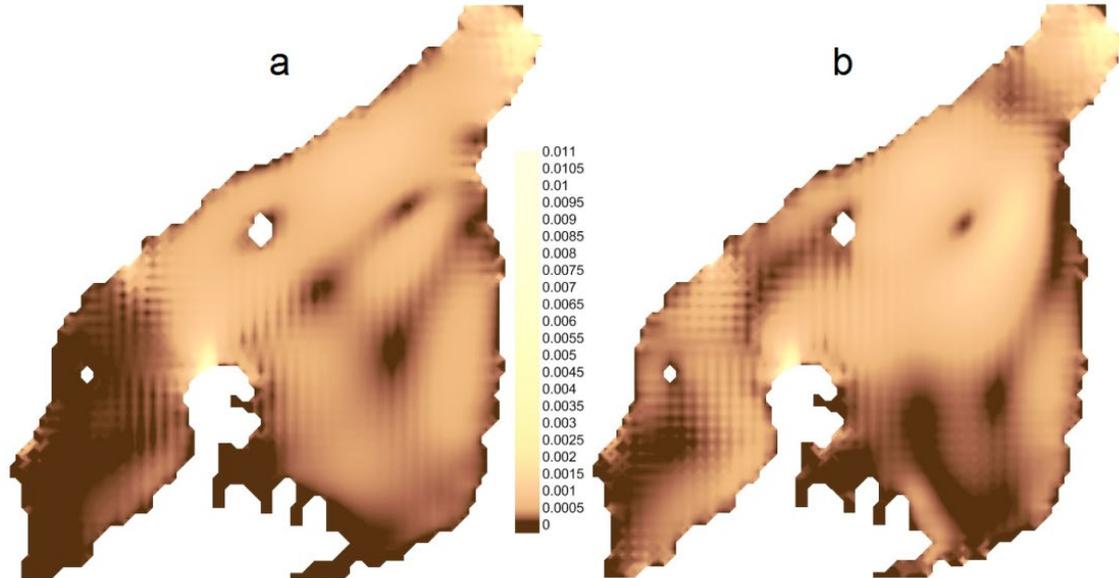


Рис. 6. Распределение расходов наносов (кг/с) в акватории оз. Неро при расходе воды р. Сара $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$ при юго-западном ветре 5 м/с (а) и при северном ветре 5 м/с (б).

Fig. 6. Distribution of sediment discharge (kg/s) in the aquatic area of Lake Nero, water discharge of River Sara – $6.7 \text{ м}^3/\text{с}$ with a southwest wind of 5 m/s (a) and with a north wind of 5 m/s (b).

С использованием модели были проведены численные эксперименты с целью оценки полей течений при реализации двух проектных решений для улучшения водообмена и оздоровления оз. Неро. Расчеты выполнялись для периода средней водности, что соответствует расходу р. Сара $3.7 \text{ м}^3/\text{с}$.

Первое проектное решение [Комплексная..., 2014 (Kompleksnaya..., 2014)] предполагало расчистку дна озера в черте г. Ростов и выемку донного грунта. При выполнении расчетов исходные глубины были скорректированы согласно схеме на рис. 7. На северо-западном участке акватории, ограниченном зеленой линией, глубины были увеличены на 0.5 м. На рис. 8 приведены значения глубин, распределение скоростей течения и распределение разности расходов наносов (расход наносов, полученный при численном эксперименте, за вычетом расхода наносов при естественном режиме ($G_{ч.э.} - G$)) в акватории оз. Неро.

Как и следовало ожидать, для участка акватории с углубленным дном скорости тече-

ния уменьшаются в несколько раз (в некоторых областях до нулевых значений) Расход наносов же за счет увеличения площади поперечного сечения незначительно вырастет непосредственно на участке углубления. Тогда как на продольной границе этого участка с нетронутой областью значения расхода наносов уменьшатся. Это вызвано уменьшением скоростей течения на этом участке.

Второе проектное предложение направлено на увеличение транзитной способности продольного участка акватории от устья р. Сары до истока р. 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. 9 приведены глубины, распределение скоростей течения и распределение разности расходов наносов (расход наносов, полученный при численном эксперименте, за вычетом расхода наносов при естественном режиме ($G_{ч.э.} - G$)) в акватории оз. Неро.

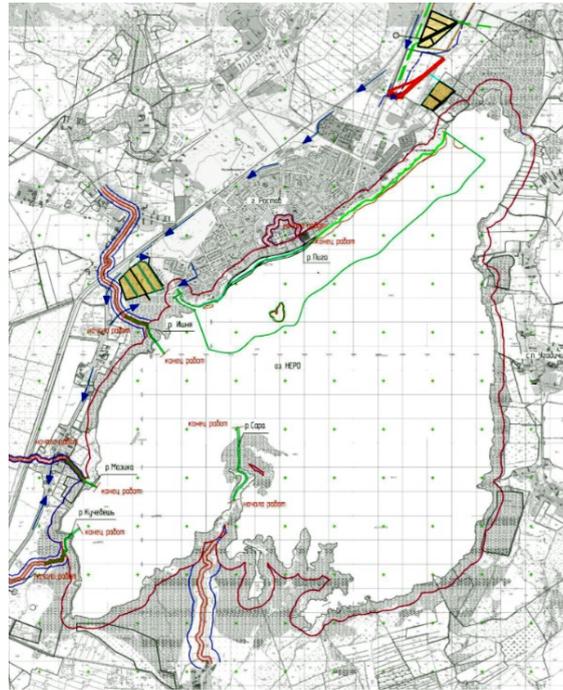


Рис. 7. Схема оз. Неро с обозначенным участком дноуглубительных работ (зеленая линия в черте г. Ростов).

Fig. 7. Scheme of Lake Nero with a designated dredging area (green line within the city of Rostov).

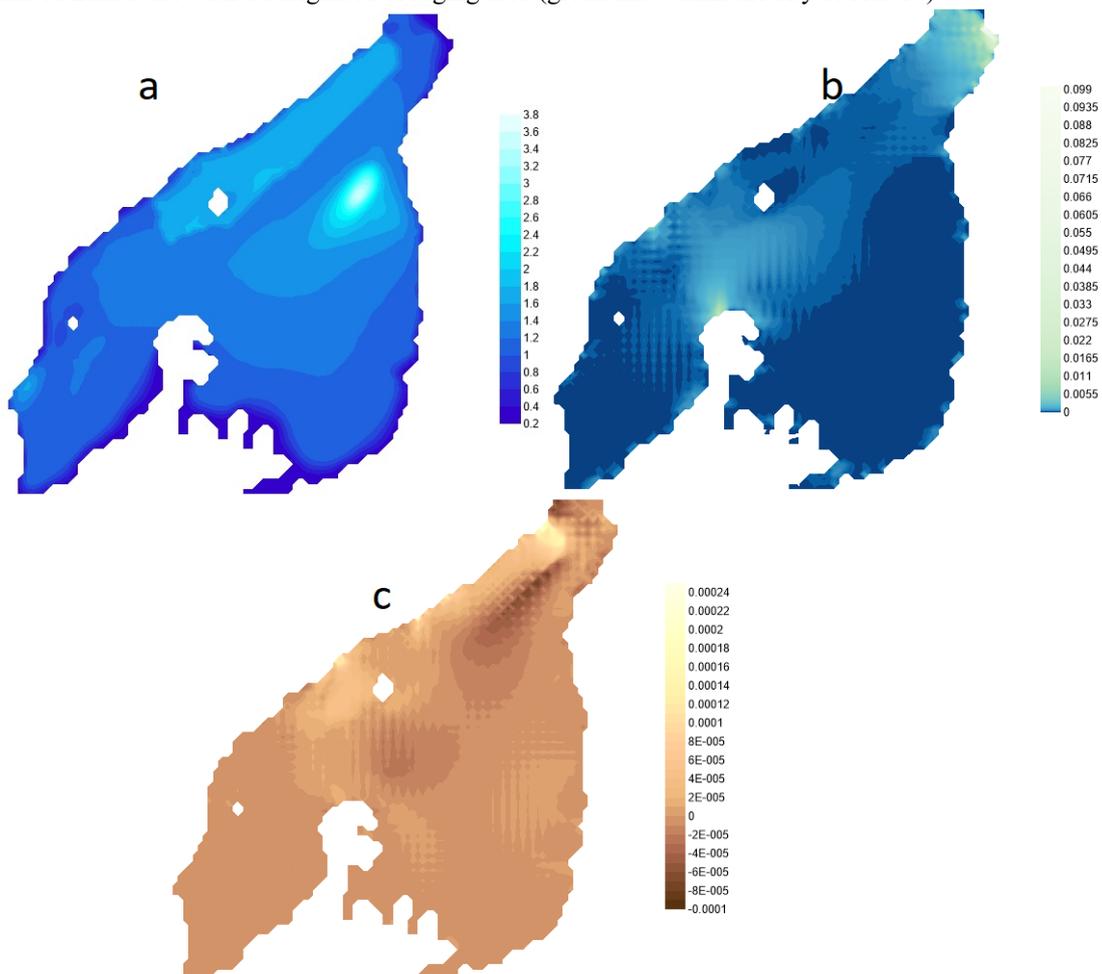


Рис. 8. Карта глубин оз. Неро для численного эксперимента, м (а); распределение скоростей течения в акватории оз. Неро, м/с (b); распределение разности расходов наносов ($G_{ч.э.} - G$), кг/с (с).

Fig. 8. Map of the depths of Lake Nero for the numerical experiment, m (a); distribution of current velocities in the aquatic area of Lake Nero, m/s (b); distribution of the difference in sediment discharge ($G_{ч.э.} - G$), kg/s (c).

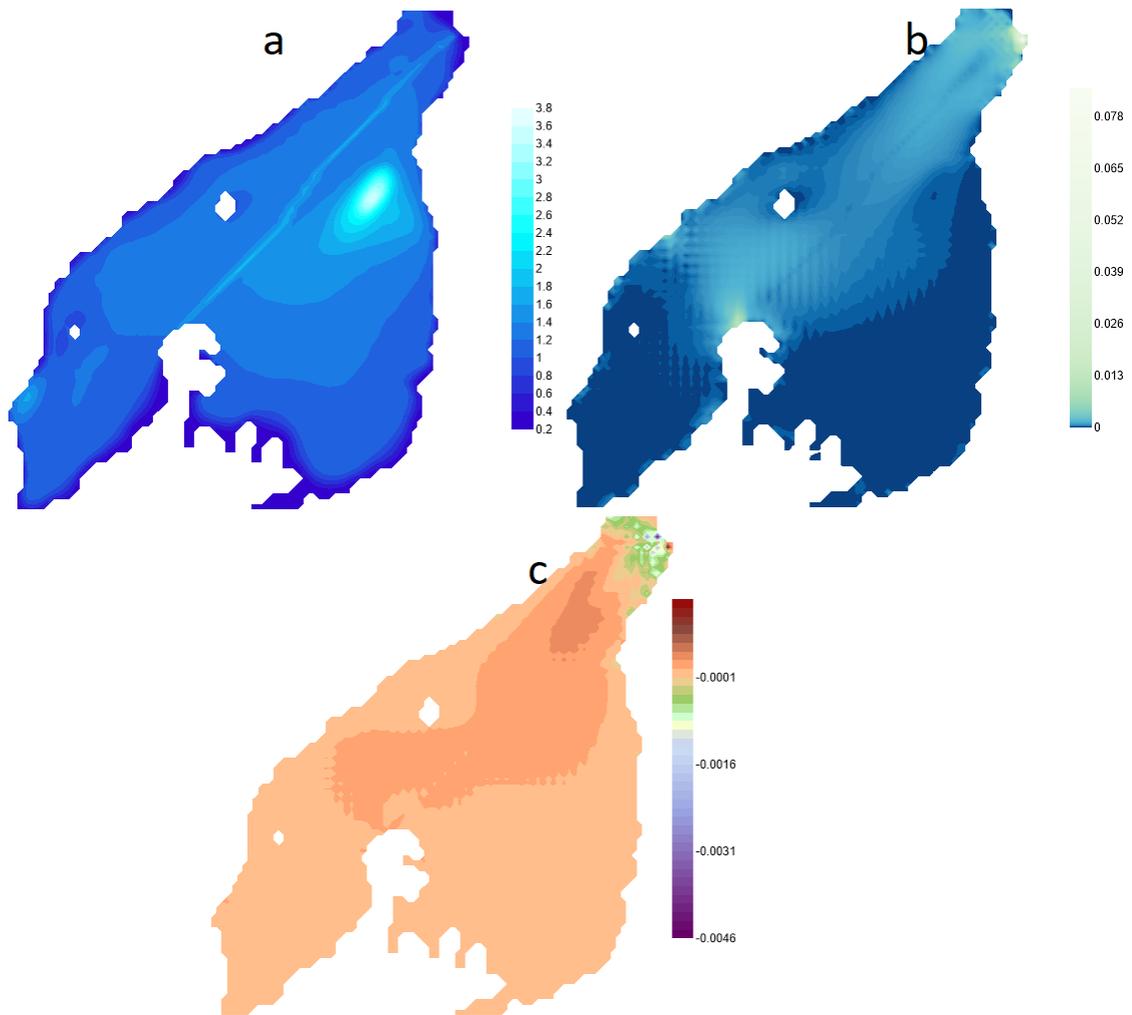


Рис. 9. Карта глубин оз. Неро для численного эксперимента, м (а); распределение скоростей течения в акватории оз. Неро, м/с (b); распределение разности расходов наносов ($G_{ч.э.} - G$), кг/с (с).

Fig. 9. Map of the depths of Lake Nero for the numerical experiment, m (a); distribution of current velocities in the aquatic area of Lake Nero, m/s (b); distribution of the difference in sediment discharge ($G_{ч.э.} - G$), kg/s (c).

Очевидно, что увеличение глубины при сохранении переносимого количества водных масс приведет к уменьшению скорости, что иллюстрирует распределение течений

на рис. 9. Уменьшение скорости определит и незначительное уменьшение значения расхода наносов (рис. 9) на несколько грамм в секунду.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием модели *IL_MTLake*, адаптированной к условиям оз. Неро, проведены численные эксперименты с целью оценки возможных последствий реализации двух проектных решений, имеющих целью улучшение водообмена и оздоровления оз. Неро. Согласно первому решению планировалась выемка донных отложений в пределах городской черты города Ростова с целью увеличения глубин в прибрежной зоне озера. Как и следовало ожидать, расчеты показали, что для участка акватории с углубленным дном скорости течения уменьшаются в несколько раз (в некоторых областях до нулевых значений). Расход наносов же за счет увеличения площади поперечного сечения потока незначительно вырастет непосредственно на участке углубления.

То есть никакого положительного эффекта это мероприятие не принесет. Второе проектное предложение должно быть направлено на увеличение транзитной способности продольного участка акватории от устья основного притока р. Сары до истока р. Вексы. Расчеты показали, что увеличение глубины на указанной траектории при сохранении переносимого количества водных масс также приведет к уменьшению скорости течений. На основании проведенного моделирования, можно сделать вывод, что практические реализации представленных проектных решений не только не приведут к улучшению водообмена в озере, но и наоборот, будут способствовать образованию застойных зон (особенно для первого проектного решения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бикбулатов Э.С., Бикбулатова Е.М., Литвинов А.С., Поддубный С.А. Гидрология и гидрохимия озера Неро. Рыбинск: Изд-во ОАО “Рыбинский дом печати”. 2003. 192 с.
- Гидрологический ежегодник. 1972. Т.4. Бассейн Каспийского моря (без Кавказа и Средней Азии). Выпуск 1–3. (Бассейн р. Волга до г. Чебоксары. Бассейн р. Ока). Горький: Верхне-Волжское УГМС. 1974. 454 с.
- Гидрологический ежегодник. 1973. Т.4. Бассейн Каспийского моря (без Кавказа и Средней Азии). Выпуск 1–3. (Бассейн р. Волга до г. Чебоксары. Бассейн р. Ока). Горький: Верхне-Волжское УГМС. 1975. 458 с.
- Гидрологический ежегодник. 1974. Т.4. Бассейн Каспийского моря (без Кавказа и Средней Азии). Выпуск 1–3. (Бассейн р. Волга до г. Чебоксары. Бассейн р. Ока). Горький: Верхне-Волжское УГМС. 1977. 466 с.
- Комплексная экологическая реабилитация озера Неро в Ростовском районе Ярославской области. Проектная документация. Раздел 1. Пояснительная записка – ООО Форватер, 2014, 50 с.
- Кондратьев С.А., Шмакова М.В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб: Нестор-История, 2019. 248 с.
- Рахуба А.В. Гидроэкологические исследования водных объектов с использованием измерительно-вычислительной системы “Хитон – Волна” // Информационно-вычислительные технологии и их приложения. Пенза: RIO ПГСХА. 2012. С. 64 – 68.
- Рекомендации по прогнозу трансформации русла в нижних бьефах гидроузлов СО 34.21.204-2005. ОАО “ВНИ-ИГ им. Б.Е. Веденеева”. СПб. 2006.
- Филатов Н.Н. Динамика озер. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 166 с.
- Шмакова М.В. Расчеты твердого стока рек и заиливания водохранилищ. СПб: ВВМ, 2018. 149 с.
- Blumberg A.F., Mellor G.L. A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model // In: Heaps N. (Ed.) Three-dimensional Coastal Ocean Models. Washington: Wiley. 1987. 208 p.
- Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. Physics of Lakes // Foundation of the Mathematical and Physical Background // Springer Verlag, Berlin. Heidelberg. 2011. Vol. 1. 434 p.
- Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. Physics of Lakes // Foundation of the Mathematical and Physical Background // Springer Verlag, Berlin. Heidelberg. 2011. Vol. 2. 646 p.
- Jørgensen S.E. Fundamentals of Ecological Modelling. Amsterdam: Elsevier. 1994. P. 450.
- Jørgensen S.E. Overview of the model types available for development of ecological models // Ecol. Modelling. 2008. Vol. 215. P. 3–9.

REFERENCES

- Bikbulatov E.S., Bikbulatova E.M., Litvinov A.S., Poddubnyj S.A. *Gidrologiya i gidrohimiya ozera Nero* [Hydrology and hydrochemistry of lake Nero]. Rybinsk: Izd-vo ОАО “Rybinskij dom pechati”, 2003. 192 p. (In Russian)
- Blumberg A.F., Mellor G.L. *A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model*. In: Heaps N. (Ed.) Three-dimensional Coastal Ocean Models. Washington: Wiley, 1987, 208 p.
- Filatov N. N. *Dinamika ozer* [Dynamics of lakes]. L.: Hydrometeoizdat, 1983. 166 p. (In Russian)
- Gidrologicheskij ezhegodnik* [Hydrological Yearbook], 1972, vol. 4, basin of the Caspian sea (without the Caucasus and Central Asia). Issue 1–3. (Pool p. Volga to Cheboksary. The river basin Oka). Gorky, Verkhne-Volzhskoe UGMS, 1974. 454 p. (In Russian)
- Gidrologicheskij ezhegodnik* [Hydrological Yearbook], 1973, vol. 4, basin of the Caspian sea (without the Caucasus and Central Asia). Issue 1–3. (Pool p. Volga to Cheboksary. The river basin Oka). Gorky, Verkhne-Volzhskoe UGMS, 1975. 458 p. (In Russian)
- Gidrologicheskij ezhegodnik* [Hydrological Yearbook], 1974, vol. 4, basin of the Caspian sea (without the Caucasus and Central Asia). Issue 1–3. (Pool p. Volga to Cheboksary. The river basin Oka). Gorky, Verkhne-Volzhskoe UGMS, 1977. 466 p. (In Russian)
- Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. Physics of Lakes. Foundation of the Mathematical and Physical Background. Springer Verlag, Berlin. Heidelberg. 2011. Vol. 1. 434 p.
- Hutter K., Wang Y., Chubarenko I. Physics of Lakes. Foundation of the Mathematical and Physical Background. Springer Verlag, Berlin. Heidelberg. 2011. Vol. 2. 646 p.
- Jørgensen S.E. Fundamentals of Ecological Modelling. Amsterdam: Elsevier. 1994. P. 450.
- Jørgensen S.E. Overview of the model types available for development of ecological models. Ecol. Modelling. 2008. Vol. 215. P. 3–9.
- Kompleksnaya ekologicheskaya rehabilitaciya ozera Nero v Rostovskom rajone Yaroslavskoj oblasti. Proektnaya dokumentaciya. Razdel 1. Poyasnitel'naya zapiska* [Comprehensive ecological rehabilitation of lake Nero in the Rostov region of the Yaroslavl region. Project documentation. Section 1. Explanatory note]. LLC Forvater, 2014, 50 p. (In Russian)
- Kondrat'ev S.A., Shmakova M.V. *Mathematical modeling of mass transfer in the catchment – watercourse – reservoir system*. Saint Petersburg: Nestor-Istoriya, 2019. 248 p. (In Russian)
- Rahuba A.V. *Gidroekologicheskie issledovaniya vodnyh ob'ektov s ispol'zovaniem izmeritel'no-vychislitel'noj sistemy “Hiton – Volna”* [Hydroecological studies of water bodies using the “Chiton – Wave” measuring and computing system]. *Informacionno-vychislitel'nye tekhnologii i ih prilozheniya*. Penza: RIO PGSKHA. 2012, pp. 64–68. (In Russian)

- Rekomendacii po prognozu transformacii rusla v nizhnih b'efah gidrouzlov SO 34.21.204-2005* [Recommendations for the forecast of riverbed transformation in the lower reaches of waterworks FROM 34.21.204-2005]. Saint Petersburg: "VNIIG by B. E. Vedeneev", 2006. (In Russian)
- Shmakova M. V. *Raschetny tverdogo stoka rek i zaileniya vodohranilishch* [Calculations of solid river flow and siltation of reservoirs]. Saint Petersburg: VVM, 2018. 149 p. (In Russian)

ABIOTIC FACTORS AFFECTING THE ECOLOGICAL STATE OF LAKE NERO ACCORDING TO MATHEMATICAL MODELING. 2. TWO-PHASE MASS TRANSFER IN THE WATER AREA

Sh. R. Pozdnyakov, S. A. Kondratyev, M. V. Shmakova

*Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences
196105, Sevastyanova str., 9, Saint Petersburg, e-mail: tbgmaster@mail.ru*

For the shallow Lake Nero, calculations of currents, sediment transport and the intensity of bottom reformation in various hydrometeorological situations were performed. The calculations were carried out using a two-dimensional model of currents and sediment transport in a shallow reservoir and an analytical formula for sediment discharge developed at the Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences. Numerical experiments have been carried out to assess the possible consequences of the implementation of two design solutions aimed at improving water exchange for the recovery of Lake Nero. According to the first decision, it was planned to excavate bottom sediments within the city limits of Rostov in order to increase the depths in the coastal zone of the lake. Calculations showed that for a section of the water area with a deep bottom, the current velocities decrease several times (in some areas, to zero values). The sediment rate will slightly increase directly in the deepening section due to the increase in the cross-sectional area of the flow. Therefor this event will not bring any positive effect. The second project proposal was to be aimed at increasing the transit capacity of the longitudinal section of the aquatic area from the mouth of the main tributary of Sara River to the inflow of Veksa River. Calculations have shown that an increase in depth along the indicated trajectory while maintaining the transferred amount of water masses will also lead to a decrease in the speed of currents. Based on the simulation, it can be concluded that the practical implementation of the presented design solutions will not lead to an improvement in water exchange in the lake, but also vice versa, will contribute to the formation of stagnant zones, especially for the first proposed design solution.

Keywords: reservoir, modeling, hydrodynamics, sediments, current, bottom reshaping