

УДК 556.013

© А. В. Рахуба^{1*}, М. В. Шмакова², 2022

¹Самарский федеральный исследовательский центр РАН, Институт экологии Волжского бассейна РАН, 445003, ул. Комзина д. 10, г. Тольятти, Россия

²Институт озероведения РАН — обособленное структурное подразделение ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр РАН», 196105, ул. Севастьянова, д. 9, г. Санкт-Петербург, Россия

*rahavum@mail.ru

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ РЕЖИМ ВОДОХРАНИЛИЩА: ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ РУСЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ С ПОДВИЖНЫМ ДНОМ

Статья поступила в редакцию 13.05.2021, после доработки 08.02.2022, принята в печать 18.05.2022

Аннотация

В работе приводятся результаты взаимосвязанного расчета неустановившегося неравномерного движения речного потока и переформирования дна крупнейшего в Евразии проточного Куйбышевского водохранилища в разные фазы водности. В основе этих расчетов лежат гидродинамическая модель «Волна» и алгоритмы расчета твердого стока (аналитическая формула расхода наносов), изменения транспортирующего потенциала потока и, как следствие последнего, изменения отметок дна. При этом динамика отметок дна учитывается в последующих расчетах и является одним из аргументов модели. На основе проведенных модельных расчетов исследовано пространственное распределение донных отложений в акватории водохранилища и построены карты аккумуляции и размыва ложа в разные фазы водности. Показано, что за весь расчетный период наблюдается неравномерное перераспределение наносов в водохранилище: в верхней части происходит размыв, а в средней и нижней — аккумуляция. В целом для Куйбышевского водохранилища вклад в заиление только русловыми наносами незначителен. В среднем за 150-дневный период моделирования для всей акватории водохранилища аккумуляция наносов составляет 0.5 мм/период. Слабая динамика течений на обширной акватории плесов водохранилища не способствует активным русловым преобразованиям. Наиболее интенсивно процессы преобразования дна протекают в местах сужения акватории, где лучше всего выражен вклад нестационарного режима в формирование рельефа дна на подъеме и спаде половодья. Более полноводные годы также приведут к более интенсивному перераспределению поступающего из верхних створов твердого стока и донных отложений.

Ключевые слова: водохранилище, моделирование, переформирование дна, наносы

© А. В. Рахуба^{1*}, М. В. Шмакова², 2022

¹Samara Federal Research Scientific Center RAS, Institute of Ecology of the Volga River Basin RAS, 445003, Komzina, 10, Togliatti, Russia

²Institute of Limnology RAS, 196105, Sevastyanova, 9, St. Petersburg, Russia

*E-mail: rahavum@mail.ru

UNSTEADY REGIME OF RESERVOIR: EXPERIENCE IN MODELING RIVERBED PROCESSES WITH A MOVABLE BED

Received 13.05.2021, Revised 08.02.2022, Accepted 18.05.2022

Abstract

The paper presents the results of the interrelated calculation of the unsteady uneven movement of the river flow and the re-formation of the bottom of the largest flowing Kuibyshev reservoir in Eurasia in different phases of water content. These calculations are based on the hydrodynamic model “Wave” and algorithms for calculating solid runoff (analytical formula for sediment flow rate), changes in the transport potential of the flow and, as a result of the latter, changes in the bottom marks. In this case, the dynamics of the bottom marks is taken into account in subsequent calculations and is one of the arguments of the model. Based on the model calculations, the spatial distribution of bottom sediments in the water area of the reservoir was investigated and maps of accumulation and erosion of the bed in different phases of water content were constructed. It is shown that for the entire calcula-

Ссылка для цитирования: Рахуба А.В., Шмакова М.В. Нестационарный режим водохранилища: опыт моделирования русловых процессов с подвижным дном // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2022. Т. 15, № 2. С. 138–149. doi:10.48612/fpg/peru-3z3h-gazh

For citation: Rakhuba A.V., Shmakova M.V. Unsteady Regime of Reservoir: Experience in Modeling Riverbed Processes with a Movable Bed. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2022, 15, 2, 138–149. doi:10.48612/fpg/peru-3z3h-gazh

tion period, an uneven redistribution of sediments in the reservoir is observed: erosion occurs in the upper part, and accumulation occurs in the middle and lower parts. In general, for the Kuibyshev reservoir, the contribution to siltation only by river sediment is insignificant. On average, over the 150-day modeling period for the entire reservoir water area, sediment accumulation is 0.5 mm/period. The weak dynamics of currents in the vast water area of the reservoir reaches does not contribute to active channel transformations. The most intensive processes of bottom transformation occur in places of narrowing of the water area, where the contribution of the non-stationary regime to the formation of the bottom relief during the rise and fall of the flood is best expressed. More full-flowing years will also lead to a more intensive redistribution of solid runoff and bottom sediments coming from the upper strata.

Keywords: water body, modeling, reshaping the bottom, sediment

1. Введение

Динамика русловых потоков, вследствие своей неравномерности и нестационарности, определяет систему речной поток — русло как неравновесную. Неравновесность системы проявляется в несоответствии переносимых потоком наносов и транспортирующей способности потока. Признаками неравновесной системы является изменение вклада кинетической энергии потока воды и движущихся наносов, а также потенциальной энергии донного и берегового грунта в общий энергетический баланс системы. Следствием этого являются русловые процессы — переформирование русла, образование и преобразование русловых форм.

К наиболее известным отечественным и зарубежным моделям, описывающим процессы русловых деформаций, можно отнести модели [1–8]. В настоящее время для инженерных задач в гидродинамических расчетах речных потоков активно используются различные отечественные и зарубежные программные комплексы, такие как Волна; Cardinal; River; GeoniCS [9]; MIKE11 [10]; HEC-RAS [11]; SOBEK [12] и др. В основе этих комплексов лежат уравнения Сен-Венана в разной численной реализации, дополненные уравнениями расхода наносов, уравнением деформации русла Экснера, уравнениями распространения примесей и др.

При достаточном количестве моделей русловых потоков, основные их отличия состоят в принятой расчетной схеме и форме представления транспорта наносов [5]. Эти модели могут быть классифицированы не только по описанным ранее признакам размерности и стационарности, но и по характеру расчетной схемы, взаимосвязанности расчетов потоков воды и твердого вещества и так далее. В монографии [5] представлена следующая классификация двухфазных гидродинамических моделей:

- по гранулометрическому составу наносов: однородная гранулометрия (наносы полагаются одного размера); неоднородная гранулометрия (нескольких размеров);
- по виду перемещения наносов: взвешенные; влекомые; общие;
- по равновесному состоянию двухфазного потока: насыщенные (расход наносов в потоке равен его транспортирующей способности); ненасыщенные;
- по взаимосвязанному расчету гидравлических переменных состояния потока и наносов: сопряженные (вычисление гидравлических переменных состояния, в том числе и расхода наносов, одновременно); частично сопряженные; несопряженные (вычисление расхода наносов по отдельным формулам);
- по дискретности движения твердого веществ в потоке: модели твердых частиц (основанные на движении отдельных частиц); модели непрерывной среды (основанные на концепции двухфазного потока).

Для деформируемых аллювиальных русел с выраженной динамикой отметок дна и конфигурации берегов в систему уравнений, описывающих динамику речного потока, уместно ввести в качестве одного из аргументов отметку дна. Такая постановка задачи «отличается от типовых задач гидродинамики, когда граничные условия рассматриваются, как постоянные величины» [13]. Все это позволяет учесть обратную реакцию речного потока на изменение морфометрии русла и провести взаимосвязанные и взаимоопределяющие гидравлико-геоморфологические расчеты. Такие модели относят к классу моделей с подвижным дном «mobile beds» [14–16].

Целью настоящей работы является оценка интенсивности переформирования дна крупнейшего в Евразии проточного Куйбышевского водохранилища в разные фазы водности на основе гидродинамической модели «Волна», дополненной алгоритмами расчета расхода наносов.

2. Объект моделирования

Куйбышевское водохранилище имеет вытянутую с севера на юг форму и достаточно сложную морфологию — места русловых сужений чередуются с плесовыми расширениями и имеют неоднородную морфометрию — мелководные обширные участки контрастируют с глубоководной русловой частью и наиболее глубоким участком водохранилища — Приплотинным плесом Жигулевской ГЭС (рис. 1). Характерной

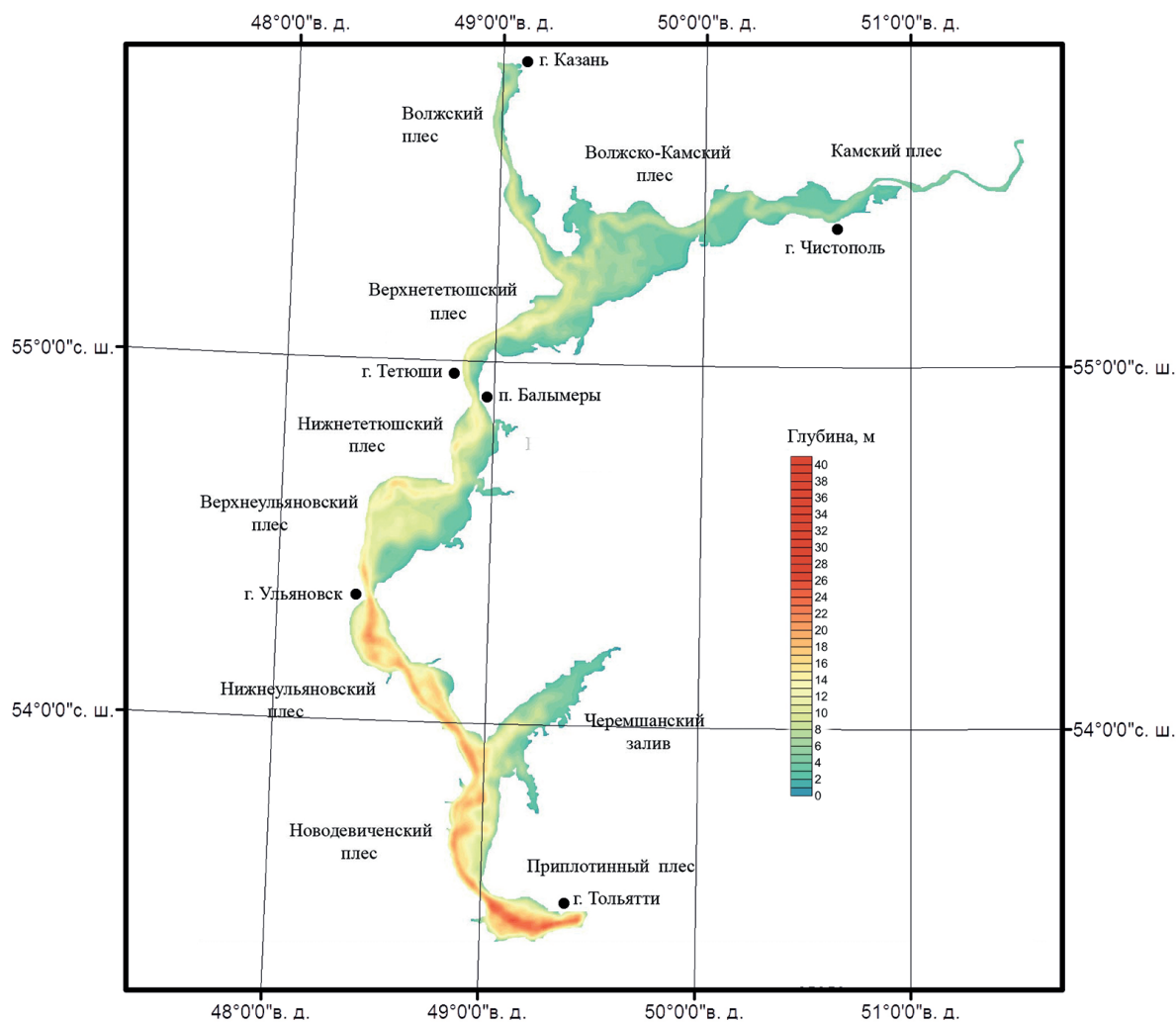


Рис. 1. Карта глубин акватории Куйбышевского водохранилища

Fig. 1. Depth map of the water area of the Kuibyshev Reservoir

особенностью подводного рельефа водохранилища является отсутствие вдоль правобережья мелководных площадей и наличие вдоль левобережья обширных мелководных зон. Выраженный глубоководный русловой желоб, по которому осуществляется основной водообмен, большая амплитуда уровня при регулировании на гидроузлах, подпорный режим определяют особенности и разнообразие русловых форм.

Наиболее характерные русловые образования — это многочисленные плесы и выраженный русловой продольный профиль. Плесы в зависимости от происхождения (подпорная устьевая область впадения притока, участок низких отметок рельефа, непосредственно подпорная область перед Жигулевской плотиной) различаются морфометрией, интенсивностью и направленностью водообмена. Русловой продольный профиль при этом относительно однороден в средней и нижней частях водохранилища, отличаясь в Камском и Волжском районах переменного подпора и в месте их слияния.

Особенно гидродинамически активными являются Волжский и Камский районы переменного подпора и места русловых сужений водохранилища. В мелководных Черемшанском и Усинском заливах (средняя глубина 5 м) влияние половодья, сезонных и суточных волн попусков на ГЭС создают колебательные разнонаправленные движения потоков воды, которые определяют интенсивность процессов переформирования дна. В глубоководных плесах водохранилища (максимальные глубины достигают 40 м) влияние неустановившегося режима так же, как и в заливах незначительно и существенно проявляется лишь в местах русловых сужений водохранилища.

Для расположенных в верховьях Куйбышевского водохранилища речных участков процессы переформирования дна определяются режимом регулирования Чебоксарского и Нижнекамского гидроузлов. Реч-

ные наносы, переносимые на рассматриваемых участках сформированы в результате русловых деформаций и эрозионной деятельности преимущественно на Чебоксарском и Нижнекамском водохранилищах. При этом, на участке Волжской ветки водохранилища (ниже г. Казань до слияния с Камой) в основном наблюдается устойчивая эрозия русла, тогда как для Камской ветки (ниже впадения р. Вятки до слияния Камы с Волгой) характерны как аккумуляция, так и размыв в разные фазы водности [17].

При этом в целом для Куйбышевского водохранилища в первые годы его существования, согласно [18] с учетом абразии берегов и размыва островов средний слой заиления составил около 8 мм. Современные исследования процессов и интенсивности осадконакопления показали, что в среднем по Куйбышевскому водохранилищу динамика органического и минерального осадконакопления составляет 4,4 мм/год [19]. С учетом соотношения ареалов, занимаемых преимущественно крупнозернистыми (пески) и тонкодисперсными (илы) осадками, интенсивность органического осадконакопления в Куйбышевском водохранилище согласно [19] составляет около 7,1 мм/год, а на минеральное осадконакопление приходится 1,8 мм/год. Как отмечают многие исследователи [18, 19, 28], с момента создания Куйбышевского водохранилища и до настоящего времени вклад абразии берегов в процесс осадконакопления в водоеме снижается. При этом, вклад берегового грунта в переформирование дна прибрежных частей акватории по-прежнему остается существенным. Основные причины этого продолжающиеся оползневые процессы на склонах, ледоход и перенос рыхлых грунтов вблизи уреза в период схода снега, подмыв берегов в периоды большой воды и ветровое волнение.

3. Методы расчета

Оценка переформирования дна Куйбышевского водохранилища построена на гидродинамической модели «Волна» [20]. Эта модель разработана в ИЭВБ РАН и основана на системе уравнений «мелкой воды». Модель дополнена алгоритмами расчета стока наносов (аналитическая формула расхода наносов [21]) и изменений транспортирующего потенциала потока [21]. Одним из аргументов модели является изменение отметки дна в каждой расчетной ячейке. Следует заметить, что в модели не рассматриваются процессы абразии берегов в результате действия различных природных агентов и органическое осадконакопление. Таким образом переформирование дна вычисляется исключительно как функция размыва/аккумуляции дна расчетного участка с учетом поступающих из верхних створов речных наносов. Система уравнений модели в двумерной постановке имеет следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = C_a \frac{\rho_a}{\rho H} W_{(x)} |W| - \frac{f_{\text{дно}}}{H} u |V| + K_L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} = C_a \frac{\rho_a}{\rho H} W_{(y)} |W| - \frac{f_{\text{дно}}}{H} v |V| + K_L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(h + \zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(h + \zeta)v]}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{dh}{dt} = dG \frac{\phi}{\rho_{\text{гр}}} \frac{1}{dx \cdot dy}, \quad (4)$$

где $u(x, y, t)$ и $v(x, y, t)$ — усредненные по глубине продольная и поперечная скорости, м/с; $h(x, y, t)$ — глубина, м; $\zeta(x, y, t)$ — уровень свободной поверхности, м; x и y — декартовы координаты расчетной сетки, м; $H = (h + \zeta)$ — полная глубина, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; C_a — коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности, б/р, который в модели определяется с использованием зависимости Банкера и Смита $C_a = 10^{-6}(0,63 + 0,066W)$; $W_{(x)}$ и $W_{(y)}$ — компоненты составляющей скорости ветра, м/с; W — результирующий вектор скорости ветра, м/с; V — результирующий вектор скорости течения, м/с;

$f_{\text{дно}} = \frac{gn^2}{H^{1/3}}$ — коэффициент придонного трения, б/р; n — коэффициент шероховатости дна, б/р; K_L — коэффициент горизонтального турбулентного обмена, м²/с; P_a — атмосферное давление, кг/(м·с²); $G(x, y, t)$ — общий расход наносов, кг/с; ϕ — плотность залегания грунта с учетом его естественной структуры, б/р.

Следует отметить, что (K_L) является эмпирическим коэффициентом для параметризации вихрей, меньше масштабов расчетной сетки, но, несмотря на то, что было проведено немало исследований в этой области, в его задании остается много неопределенности. В проведенных расчетах K_L принимался равным постоянной величине (табл. 1).

Аналитическая формула расчета общего расхода наносов [21] имеет вид:

$$G(x, y, t) = \frac{\rho_{гр}}{\rho_{гр} - \rho_{в}} Q(x, y, t) \left[\frac{c_{гр}}{h(x, y, t)g} - (1 - f)\rho_{в}I \right], \quad (5)$$

где $Q(x, y, t)$ — расход воды, м³/с; $\rho_{гр}$ и $\rho_{в}$ — плотность грунта и воды соответственно, кг/м³; I — уклон дна, б/р; f — коэффициент внутреннего трения, б/р (допускается значение $f > 1$); $c_{гр}$ — сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²).

Для системы уравнений гидродинамики (1)–(4) на твердых боковых границах нормальная компонента скорости u_n задавалась равной нулю. Для тангенциальной компоненты u_τ вводится квадратичный закон трения (закон стенки). Таким образом, граничное условие на твердых боковых границах имеет вид:

$$u_n = 0, K_L \frac{\partial u_\tau}{\partial n} = -f_b u_\tau |V|, \quad (6)$$

где f_b — коэффициент бокового трения, б/р, который рассчитывается по логарифмическому закону стенки:

$$f_b = \frac{k^2}{(\ln(z/n))^2}, \quad (7)$$

$k = 0,41$ — постоянная Кармана; z — расстояние до ближайшего узла сетки, м; n — коэффициент шероховатости дна, б/р.

Исходя из допущения, что стенки контура расчетной области и поверхность дна сложены одним и тем же грунтовым комплексом, для расчета коэффициентов придонного $f_{дно}$ и «бокового» f_b трения в модели используется одинаковое значение коэффициента шероховатости n . (табл. 1).

На открытых входных боковых границах (реки Волга, Кама, Казанка, Черемшан, Шешма) в узлах сетки модели задается временной ход нормальной к границе скорости u_n , величина которой рассчитывается через уровень и задаваемый расход притока в расчетную область. При этом на открытых границах скорость вдоль стенки u_τ равна нулю. На выходном створе (Жигулевская ГЭС), где вода вытекает из расчетной области, задается линейная зависимость между нормальной компонентой скорости и уровнем $u_n = \pm (g/h)^{1/2} \zeta$ (так называемое условие «излучения»). Данные по ежедневным расходам Волги и Камы предоставлены компанией «РусГидро» [29], а боковых притоков — взяты из Гидрологического ежегодника [30].

Для получения численного решения уравнений (1)–(5) была использована схема Кранка-Николсона с применением метода расщепления второго порядка точности [22]. Уравнения решаются полуявным конечно-разностным методом, в котором адвективные члены и горизонтальный турбулентный обмен аппроксимированы явно, а градиенты уровня и придонное трение аппроксимированы неявно [23].

Модель Куйбышевского водохранилища разработана с использованием регулярной прямоугольной сетки и разделена на 143562 расчетных узла с шагом 200 м. Вычисления проводились с модельным шагом по времени 5 с. Значения параметров модели были получены в ходе процедуры калибровки и представлены в таблице 1. Верификация модели по гидродинамическим характеристикам была проведена по данным скоростей течения и мутности воды в акватории водохранилища за летний период 1969 года и представлена в работе [24].

Таблица 1

Table 1

Параметры модели
Model parameters

Обозначения	Единица измерения	Значение
n	б/р	0,038
K_L	м ² /с	225
$c_{гр}$	кг/(м·с ²)	2,01
φ	б/р	1,67
$\rho_{гр}$	кг/м ³	2650
f	б/р	0,94

Расход наносов на твердых боковых границах и открытых боковых границах в местах впадения основных притоков (Свияга, Казанка, Черемшан, Шешма) задавался вычислением общего расхода наносов в соответствии с гидравлическими переменными состояниями потока. Параметры формулы (5) назначались в соответствии с крупностью донных отложений Куйбышевского водохранилища — илы и мелкозернистые пески.

Определенным преимуществом формулы (5) является аналитический вывод из основного уравнения двухфазного массопереноса гидродинамической модели движения воды и твердого вещества в речном потоке [21, 25]. Эта модель основана на балансе сил, действующих в системе «водный поток — донные отложения — наносы». В уравнении двухфазного массопереноса силы записаны не по отношению к потоку воды, а по отношению к движущемуся твердому веществу (сдвигающая проекция силы тяжести потока воды, удерживающая проекция силы тяжести движущихся частиц, силы инерции потока воды и движущихся частиц, сила сопротивления грунта сдвигу). Также взаимодействие потока воды и дна представлено сопротивлением донного грунта касательной нагрузке со стороны потока. Таким образом формула (5) основана на взаимосвязанном расчете потока воды и твердого вещества и обеспечивается качественной, а не количественной характеристикой крупности донных отложений. Параметры трения определяются функционально через категории крупности донных отложений, которые представлены широкими диапазонами размеров донного грунта (весь спектр гранулометрической крупности донных отложений речных русел). Формула (5) прошла убедительную апробацию на водотоках с различными гидравлическими характеристиками, расположенными в разных физико-географических зонах, и показала хорошие результаты [21].

Новизна моделирующей системы (1)—(7) состоит в численной реализации традиционных гидродинамических уравнений и аналитической формулы общего расхода наносов, что позволяет дать совместное решение задачи двухфазного массопереноса. Относительно небольшие значения расхода наносов в расчетных ячейках позволяют реализовать несвязанный расчет гидравлических переменных состояний потока и твердого вещества [5].

Результаты расчетов скорости переформирования дна наиболее глубоководной части Куйбышевского водохранилища — Приплотинного плеса — были уже представлены авторами в работе [26]. В этой работе были приведены скорости размыва и аккумуляции речных наносов для разных фаз водности и показаны наиболее гидродинамически активные области исследуемой акватории.

В данном исследовании для всей акватории Куйбышевского водохранилища при нестационарном режиме расчета на примере среднего по водности 2015 года и периода 150 дней была вычислена интенсивность переформирования дна для разных фаз водности и в целом для всего расчетного периода. Всего за расчетный период были выделены четыре фазы водности — период подъема половодья (30 сут), период большой воды (40 сут), период спада половодья (30 сут), меженный период (50 сут) (рис. 2).

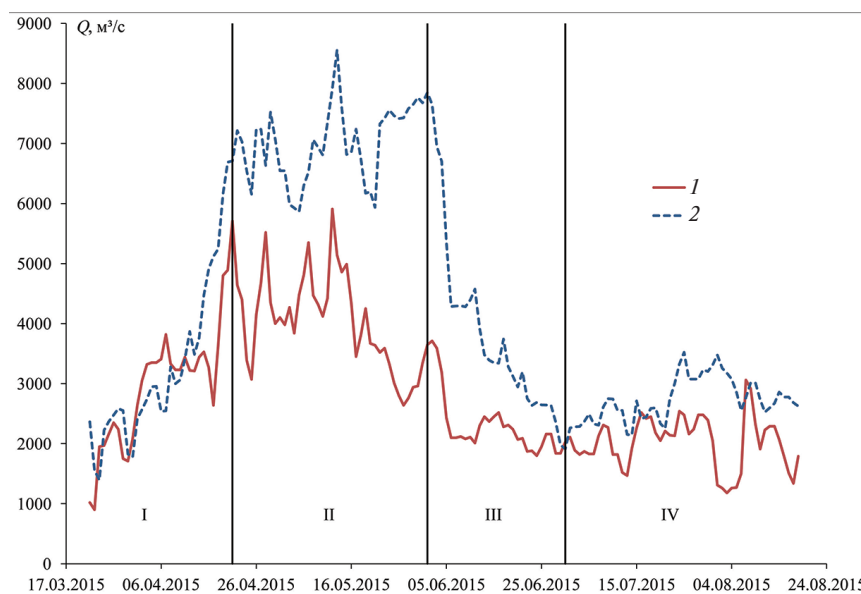


Рис. 2. Гидрографы рек Волга — Чебоксарская ГЭС (1) и Кама — ниже устья Вятки (2), 2015 год с выделенными периодами водности: I — подъем половодья; II — период большой воды; III — спад половодья; IV — летняя межень

Fig. 2. Hydrographs of the rivers Volga — Cheboksarskaya HPP (1) and Kama — below the mouth of the Vyatka (2), 2015 with highlighted periods of water availability: I — flood rise; II — the period of high water; III — flood decline; IV — summer low water

4. Результаты моделирования

На рис. 3 приведены результаты вычислений переформирования дна Куйбышевского водохранилища в 30-дневные периоды подъема (*a*) и спада (*б*) половодья, а также суммарная аккумуляция/размыв за весь 150-дневный период расчета. Наибольшая интенсивность переформирования дна приходится на периоды подъема (размыв) и спада (намыв) половодья. На подъеме половодья наибольшие значения

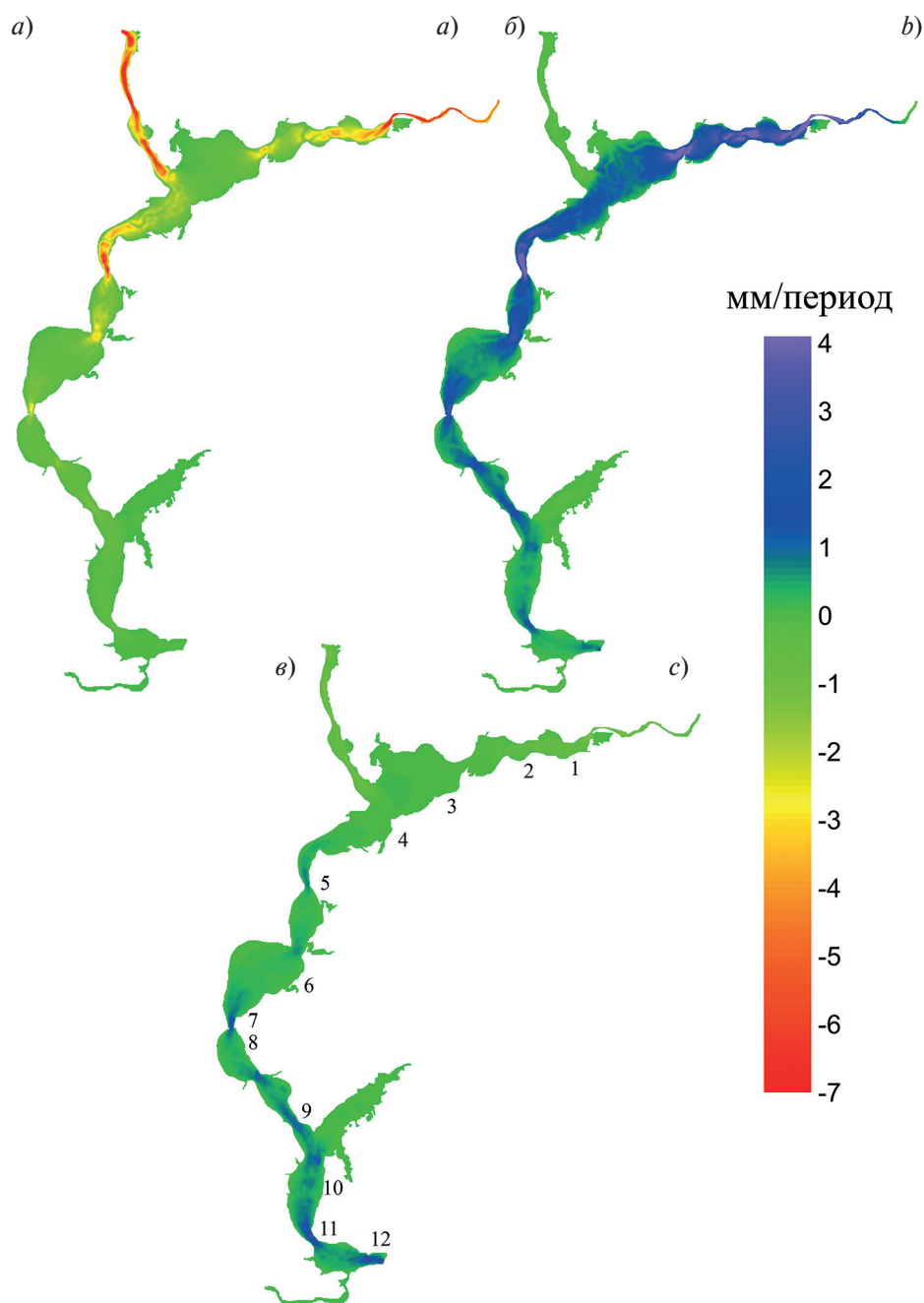


Рис. 3. Результаты моделирования переформирования дна Куйбышевского водохранилища, мм/период: *a* — в 30-дневный период подъема половодья; *б* — в 30-дневный период спада половодья; *в* — суммарная аккумуляция (>0)/размыв (<0) за весь 150-дневный период расчета

Fig. 3. Results of modeling the reshaping of the bottom of the Kuibyshev Reservoir, mm / period: *a* — during the 30-day period of flood rise; *b* — in a 30-day period of flood decline; *c* — total accumulation (> 0) / erosion (<0) for the entire 150-day calculation period

размыва достигаются в Волжской ветке до слияния с Камой и в Камской ветке — до влияния подпора, а также в местах русловых сужений водохранилища достигая 20 мм/мес и более. В основной части водохранилища в среднем за рассматриваемый период общий размыв дна согласно результатам моделирования составляет 1–2 мм/мес.

На спаде половодья продолжается незначительный размыв дна в Волжском плесе и Черемшанском заливе с интенсивностью 0,5 мм/мес. В Черемшанском заливе размыв дна вызван крупномасштабной циклонической циркуляцией течения, обусловленной геометрией залива и влиянием прохождения по водохранилищу прямых и обратных волн попуска от ГЭС. Эта циркуляция определяет направленность движения наносов и эрозию дна, представленного несвязанными грунтами. В средней и нижней части водохранилища (Ульяновский, Новодевичий и Приплотинный плесы), на спаде половодья транспортирующий потенциал потока снижается, что приводит к аккумуляции наносов от 0,5 мм в плесах и до 1,0 мм в районах сужений акватории водохранилища. Наиболее интенсивно процессы аккумуляции наблюдаются в Камском и Тетюшинском плесах, достигая 4 мм, особенно в зоне выклинивания подпора, где максимальные значения превышают 20 мм/мес.

В целом за весь расчетный период (150 сут) в верхней части водохранилища (Волжский и Камский плесы) наблюдается размыв дна, а в средней и нижней части (Волжско-Камский, Тетюшинский, Ульяновский, Новодевичий и Приплотинный плесы) — аккумуляция наносов. С начала половодья максимальный размыв дна составляет более 1,0 мм за период, аккумуляция — более 2,5 мм за период. Области наибольшей аккумуляции приходятся на Приплотинный плес (Климовское сужение и участок перед Жигулевской ГЭС). Следует отметить, что снижение размывающей способности потока и увеличение аккумуляции по длине реки от верхних участков к нижним, характерна для всех равнинных рек [27].

На рис. 4 (I) приведен продольный профиль изменения отметок дна для указанных периодов. Цифрами на графике обозначены переломные точки продольного профиля: 1 — г. Чистополь (р. Кама); 2 — п. Речное (р. Кама); 3 — п. Лаишево (Волжско-Камский плес); 4 — п. Куйбышевский затон (Тетюшинский плес); 5 — п. Балымеры (сужение русла, Тетюшинский плес); 6 — п. Ундоры (Верхнеульяновский плес); 7 — г. Ульяновск (Верхнеульяновский плес); 8 — г. Новоульяновск (Нижнеульяновский плес); 9 — г. Сенгилей (Нижнеульяновский плес); 10 — п. Новодевичье (Новодевичий плес); 11 — п. Климовка (Приплотинный плес); 12 — п. Тольятти (верхний бьеф Приплотинного плеса). Места расположения переломных точек продольного профиля, привязанные к населенным пунктам на карте водохранилища показаны на рис. 3, в.

Наиболее интенсивные процессы размыва/аккумуляции для периодов подъема и спада половодья наблюдаются в точках 2, 5, 7, 9, 11, 12. Это связано с большими градиентами скорости течения в Камской ветке на подъеме и спаде половодья (т. 2), с более интенсивным изменением водообмена в местах русловых сужений водохранилища (т. 5, 7, 9, 11) и в зоне влияния сброса воды Жигулевской ГЭС перед плотиной (т. 12).

Результаты моделирования показали, что за весь расчетный период наибольшая интенсивность переформирования продольного профиля пришлась на Волжский и Камский районы переменного подпора, на весь Тетюшинский плес и участки русловых сужений между плесами. Полученные результаты хорошо согласуются с данными, приведенными в [17], где замечено, что для указанных участков характерны интенсивные отложения в весенний период.

На рис. 4 (II) представлен поперечный профиль переформирования дна для наиболее гидродинамически активной части Куйбышевского водохранилища в створе п. Балымеры. Согласно полученным результатам, наименьшая интенсивность переформирования дна приходится на глубоководную часть исследуемого створа у правого берега (на рис. 4 (II) слева), где глубины достигают 25 и более метров. За весь расчетный период изменений отметок дна на рассматриваемом участке практически не наблюдается. На мелководье со стороны левого берега (на рис. 4 (II) справа), характеризующегося глубинами около пяти метров, приходится наибольшие значения размыва и намыва — до 15–20 мм/мес. Но при этом, за весь 150-дневный период моделирования имеет место незначительное осадконакопление в пределах 1–2 мм за период.

Необходимо отметить, что натурных наблюдений по оценке динамики переформирования дна в разные фазы водности в каких-либо районах Куйбышевского водохранилища не проводилось. Можно лишь отметить работы [17, 28], в которой подтверждается наличие смыва продуктов заиления в период весенней пульсации скорости стокового течения и приводятся некоторые количественные оценки увеличения отметок дна для периода средней водности. В целом, величина аккумуляции наносов в водохранилище, представленная в расчетах на модели, не противоречит результатам натурных наблюдений в ранее опубликованных работах [19, 28], где указана скорость минерального осадконакопления порядка 1,8 мм/год.

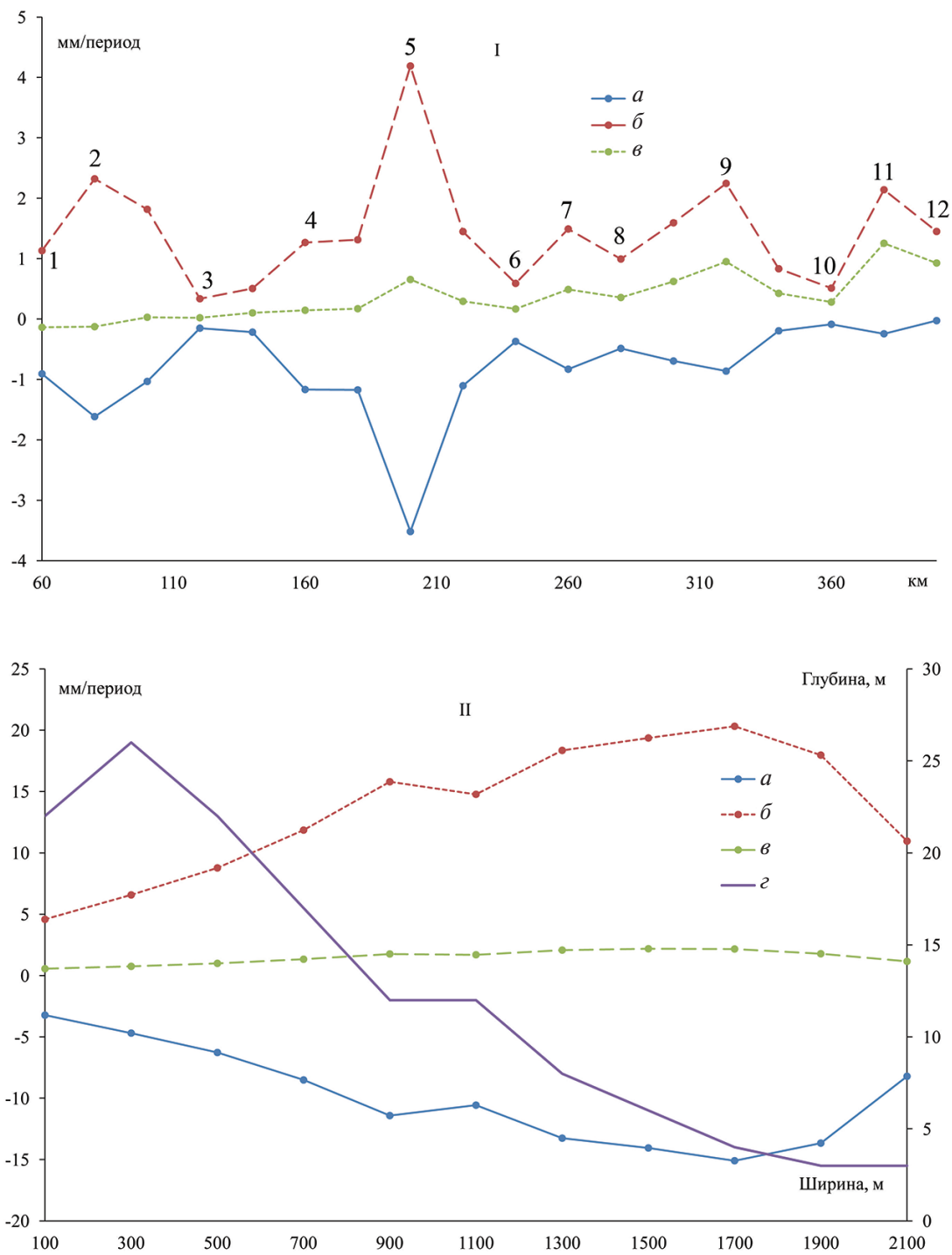


Рис. 4. I — Продольный профиль изменения отметок дна от г. Чистополь на р. Кама до Жигулевской ГЭС, мм/период: *a* — за 30-дневный период подъема половодья; *b* — за 30-дневный период спада половодья; *c* — суммарная аккумуляция (>0)/размыв (<0) за весь 150-дневный период расчета. II — Поперечный профиль Куйбышевского водохранилища в створе п. Балымеры: *a* — за 30-дневный период подъема половодья, мм/ период; *b* — за 30-дневный период спада половодья, мм/период; *c* — суммарная аккумуляция (>0)/размыв (<0) за весь 150-дневный период расчета, мм/период; *d* — глубина, м

Fig. 4. I — Longitudinal profile of changes in bottom elevations from Chistopol to the river Kama to Zhigulevskaya HPP, mm / period: *a* — over a 30-day period of flood rise; *b* — over a 30-day period of flood decline; *c* — total accumulation (> 0) / erosion (<0) for the entire 150-day calculation period. II — Cross-section of the Kuibyshev Reservoir in the section of the Balymery settlement: *a* — for a 30-day period of flood rise, mm / period; *b* — for a 30-day period of flood decline, mm / period; *c* — total accumulation (> 0) / erosion (<0) for the entire 150-day calculation period, mm / period; *d* — depth, m

5. Заключение

В результате моделирования получены карты полей переформирования дна в разные фазы водности, которые иллюстрируют направленность процессов размыва и аккумуляции для всей акватории Куйбышевского водохранилища. Для всего 150-дневного периода моделирования в среднем по акватории намыв составляет 0,5 мм, максимальные значения приходятся на плесовые сужения и равняются 2,5 мм и более, минимальные значения приходятся на плесовые расширения. Полученные результаты хорошо согласуются с данными наблюдений.

Построенный по всему водохранилищу продольный профиль и в его центральной части — поперечный профиль, хорошо показывают вклад нестационарного режима в формирование рельефа дна на подъеме и спаде половодья. Показано, что в створе п. Балымеры на мелководье со стороны левого берега, приходится наибольшие значения размыва и намыва — до 15–20 мм/мес. Этот створ совместно с Приплотинным плесом и Нижнеульяновским плесом в створе п. Сенгилей характеризуются наибольшей интенсивностью вертикальных русловых деформаций.

Модельные расчеты показали, что незначительные скорости течения недостаточны для инициации активных русловых преобразований Куйбышевского водохранилища. Последнее означает, что речные наносы не являются определяющим для заиления водохранилища фактором. При этом, многоводные периоды, характеризующиеся более интенсивным водообменом, приведут к более заметной циркуляции твердого стока в акватории и, как следствие, переформированию дна всего водохранилища.

6. Финансирование

Работа выполнена при финансовом обеспечении за счет средств Федерального бюджета в рамках тем: № 1021060107175-5-1.6.19 (ИЭВБ РАН — филиал СамНЦ РАН) и № 0154-2019-0003 (ИНОЗ РАН — СПб ФИЦ РАН).

Литература

1. *Kerssens P.J.M., van Rijn L.C.* Model for non-steady suspended sediment transport // Project Engineers Delft hydraulics laboratory. Delft, Netherlands, 1977. 8 p.
2. *Van Rijn L.C.* Sedimentation of dredged channels by currents and waves // Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. 1986. Vol. 112, N 5. P. 541–559.
3. *Nicolas A.P.* Modeling and monitoring flow and suspended sediment transport in lowland river flood plain environments // Erosion and Sediment transport Measurement in River: Technological and Methodological Advances (Proceedings of the Oslo Workshop, June 2002). IAHS Publ. 2003. 283 p.
4. *Singh V.* Two-dimensional sediment transport model using parallel computers // B. Tech. Banaras Hindu University, India. 2002. 109 p.
5. *Wu Weiming.* Computational River Dynamics. CRC Press, 2007. 509 p.
6. *Хабидов А.Ш., Леонтьев И.О., Марусин К.В., Шлычков В.А., Савкин В.М., Кусковский В.С.* Управление состоянием берегов водохранилищ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 239 с.
7. *Sanchez A., Wu W.* A non-equilibrium sediment transport model for coastal inlets and navigation channels. In: Roberts T.M., Rosati J.D., and Wang P. (eds.) // Proceedings, Symposium to Honor Dr. Nicholas C. Kraus. Journal of Coastal Research. Special Issue. 2011. N 59. P. 39–48.
8. *Потапов И.И., Снугур К.С.* Моделирование эволюции песчано-гравийного дна канала в одномерном приближении // Компьютерные исследования и моделирование. 2015. Т. 7, № 2. С. 315–328.
9. GeoniCS Каналы и реки (Aquaterra). 2013. URL: <http://www.csoft.ru/catalog/soft/aquaterra/aquaterra-2013.html> (дата обращения: 04.02.2022).
10. DHI. URL: <http://www.dhigroup.com> (дата обращения: 04.02.2022).
11. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69). Gary W., Brunner. Version 4.1. January 2010. 411 p.
12. SOBEK Suite. URL: <https://www.deltares.nl/en/software/sobek/> (дата обращения: 04.02.2022).
13. *Лепухин А.П., Тунов А.А.* Современные гидродинамические модели русловых процессов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2019. № 4. С. 114–143. doi:10.35567/1999-4508-2019-4-6
14. *Berger R.C., Tate J.N., Brown G.L., Savant G.* Adaptive Hydraulics (AdH) Version 4.5. Hydrodynamic User Manual. January. 2015.
15. *Delft3D-FLOW* Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. January 12, 2011 Delft Deltares. 672 p.

16. Reference Manual «RiverFlow2D Two-Dimensional River Dynamics Model», August, 2016, Hydronia LLC. 229 p.
17. Куйбышевское водохранилище / Ред. А.В. Монаков. Л.: Наука, 1983. 214 с.
18. Широков В.М. Формирование современных донных отложений в Куйбышевском водохранилище // Труды Куйбышевской гидрометеорологической обсерватории. 1965. Вып. 5. С. 28–32.
19. Законнов В.В., Законнова А.В., Цветков А.И., Шерышева Н.Г. Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада // Труды ИБВВ РАН. 2018. Вып. 81 (84). С. 35–46. doi:10.24411/0320-3557-2018-1-0004
20. Рахуба А.В. Опыт использования измерительно-вычислительной системы «Хитон-Волна» в гидроэкологических исследованиях прибрежной акватории г. Тольятти // Сборник научных трудов по материалам 8-й Международной научно-практической конференции. Экологические проблемы промышленных городов. Саратов: Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 2017. С. 484–488.
21. Шмакова М.В. Расчёты твердого стока рек и заиления водохранилищ. СПб.: Издательство ВВМ, 2018. 149 с.
22. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики: учеб. пособие. М.: Наука, 1989. 608 с.
23. Вольцингер Н.Е., Пяковский Р.В. Теория мелкой воды. Океанологические задачи и численные методы. Л.: Гидрометеиздат, 1977. 207 с.
24. Рахуба А.В., Шмакова М.В., Кондратьев С.А. Численное моделирование массопереноса в проточном водоеме // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2021. Т. 14, № 2. С. 89–97. doi:10.7868/S2073667321020088
25. Кондратьев С.А., Шмакова М.В., Игнатьева Н.В., Иванова Е.В., Гузеватый В.В. Экспериментальные и модельные исследования распространения вод реки Ижоры в русле реки Невы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2020. Т. 13. № 3. С. 83–92. doi:10.7868/S2073667320030077
26. Рахуба А.В., Шмакова М.В. Численное моделирование заиления приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища речными наносами // Метеорология и гидрология. 2018. № 1. С. 68–75.
27. Алексеевский Н.И., Беркович К.М., Чалов Р.С., Чалов С.Р. Пространственно-временная изменчивость русловых деформаций на реках России // География и природные ресурсы. 2012. № 3. С. 13–21.
28. Ступишин А.В., Трофимов А.М., Широков В.М. Географические особенности формирования берегов и ложа Куйбышевского водохранилища. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1981. 184 с.
29. Изменения уровней водохранилищ ГЭС РусГидро. URL: <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/> (дата обращения: 26.04.2022)
30. Гидрологический ежегодник 2015 г. Т. 1 Вып. 24, ч. 1–2. Бассейн р. Волги (среднее и нижнее течение) и Урала. Самара: Приволжское УГМС, 2016. 318.

References

1. Kerssens P.J.M., van Rijn L.C. Model for non-steady suspended sediment transport. Project Engineers Delft hydraulics laboratory. Delft, Netherlands, 1977. 8 p.
2. Van Rijn L.C. Sedimentation of dredged channels by currents and waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 1986, 112, 5, 541–559.
3. Nicolas A.P. Modeling and monitoring flow and suspended sediment transport in lowland river flood plain environments. Erosion and Sediment transport Measurement in River: Technological and Methodological Advances (Proceedings of the Oslo Workshop, June 2002). *IAHS Publ.* 2003. 283 p.
4. Singh V. Two-dimensional sediment transport model using parallel computers. B. Tech. *Banaras Hindu University, India*, 2002. 109 p.
5. Wu Weiming. Computational River Dynamics. *CRC Press*, 2007. 509 p.
6. Khabidov A. Sh., Leontiev I.O., Marusin K.V., Shlychkov V.A., Savkin V.M., Kuskovsky V.S. Managing the condition of reservoir shores. *Novosibirsk, Izd-vo SO RAN*, 2009. 239 p. (in Russian).
7. Sanchez A., Wu W. A non-equilibrium sediment transport model for coastal inlets and navigation channels. In: Roberts T.M., Rosati J.D., and Wang P. (eds.). *Proceedings, Symposium to Honor Dr. Nicholas C. Kraus. Journal of Coastal Research*. Special Issue. 2011, 59, 39–48.
8. Potapov I.I., Snigur K.S. Modeling of the evolution of the sand-gravel bottom of the channel in a one-dimensional approximation. *Komp'yuternye Issledovaniya i Modelirovanie*. 2015, 7 (2), 315–328 (in Russian).
9. GeoniCS Каналы и реки (Aquaterra). 2013. URL: <http://www.csoft.ru/catalog/soft/aquaterra/aquaterra-2013.html> (Accessed: 04.02.2022).
10. DHI. <http://www.dhigroup.com> (Accessed: 04.02.2022).
11. HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual (CPD-69). Gary W., Brunner. Version 4.1. January 2010. 411 p.

12. SOBEK Suite. URL: <https://www.deltares.nl/en/software/sobek/> (Accessed: 04.02.2022).
13. Lepihin A.P., Tiunov A.A. Modern hydrodynamic models of riverbed processes. *Vodnoye Hozyajstvo Rossii: Problemy, Tekhnologii, Upravlenie*. 2019, 4, 114–143 (in Russian). doi:10.35567/1999-4508-2019-4-6
14. Berger R.C., Tate J.N., Brown G.L., Savant G. Adaptive Hydraulics (AdH) Version 4.5. *Hydrodynamic User Manual*. January. 2015.
15. Delft3D-FLOW Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. *User Manual*. January 12, 2011. *Delft Deltares*. 672 p.
16. Reference Manual «RiverFlow2D Two-Dimensional River Dynamics Model», August, 2016, *Hydronia LLC*. 229 p.
17. Kuibyshev reservoir / Ed. A.V. Monakov. *Leningrad, Nauka*, 1983. 214 p. (in Russian).
18. Shirokov V.M. Formation of modern bottom sediments in the Kuibyshev reservoir. *Trudy Kujbyshevskoy Gidrometeorologicheskoy Observatorii*. 1965, 5, 28–32 (in Russian).
19. Zakonnov V.V., Zakonnova A.V., Cvetkov A.I., SHerysheva N.G. Hydrodynamic processes and their role in the formation of bottom sediments in reservoirs of the Volga-Kama cascade. *Trudy IBVV RAN*. 2018, 81 (84), 35–46 (In Russian). doi:10.24411/0320-3557-2018-1-0004
20. Rakhuba A.V. Experience of using the measuring and computing system “Chiton-Wave” in hydroecological studies of the coastal water area of Togliatti. *Ekologicheskie Problemy Promyshlennyh Gorodov. Saratov*, 2017, 484–488 (in Russian).
21. Shmakova M.V. Calculations of solid river flow and reservoir siltation. *SPb., Izdatel'stvo VVM*, 2018. 149 p. (in Russian).
22. Marchuk G.I. Methods of computational mathematics. *Moscow, Nauka*, 1989. 608 p. (In Russian).
23. Volcinger N.E., Pyaskovskij R.V. Shallow water theory. Oceanological problems and numerical methods. *Leningrad, Gidrometeoizdat*, 1977. 207 p. (in Russian).
24. Rakhuba A.V., Shmakova M.V., Kondratiev S.A. Numerical modeling of mass transfer in a flowing reservoir. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2021, 14 (2), 89–97 (in Russian). doi:10.7868/S2073667321020088
25. Kondratiev S.A., Shmakova M.V., Ignatieva N.V., Ivanova E.V., Guzevaty V.V. Experimental and model studies of the distribution of the waters of the Izhora River in the bed of the Neva River. *Fundamental and Applied Hydrophysics*. 2020, 13 (3), 83–92 (in Russian). doi:10.7868/S2073667320030077
26. Rakhuba A.V., Shmakova M.V. Numerical simulation of siltation of the near-dam ples of the Kuibyshev reservoir by river sediments. *Meteorologiya i Gidrologiya*. 2018, 1, 68–75 (in Russian).
27. Alekseevskij N.I., Berkovich K.M., CHalov R.S., CHalov S.R. Spatial and temporal variability of channel deformations on Russian rivers. *Geografiya i Prirodnye Resursy*. 2012, 3, 13–21 (in Russian).
28. Stupishin A.V., Trofimov A.M., SHirokov V.M. Geographical features of the formation of the banks and the bed of the Kuibyshev reservoir. *Kazan', Izd-vo Kazan. un-ta*, 1981. 184 p. (in Russian).
29. Changes in reservoir levels of HPPs RusHydro. URL: <http://www.rushydro.ru/hydrology/informer/> (Accessed: 17.12.2018).
30. Hydrological Yearbook 2015. Vol. 1 Issue. 24, ch. 1–2. River basin Volga (middle and lower reaches) and the Urals. Samara: *Privolzhskoye UGMS*, 2016, p. 318.