

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАИЛЕНИЯ КАК ФАКТОРА ЭВТРОФИРОВАНИЯ ВОДНЫХ МАСС КУЙБЫШЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

© 2015 А.В. Рахуба¹, М.В. Шмакова²¹ Институт экологии Волжского бассейна РАН, Тольятти² Институт озерадения РАН, Санкт-Петербург

Поступила 26.03.2015

При изучении условий формирования динамики подводного рельефа крупных водохранилищ наряду с особенностями морфологии котловины и характером обрушения берегов большое значение имеет оценка гидродинамической активности водных масс, которая связана с режимом регулирования стока. В данной работе на основе модельных экспериментов исследуется пространственная изменчивость донных отложений и неоднородность распределения фосфора в акватории приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища.

Ключевые слова: математическая модель, донные отложения, эвтрофирование, гидродинамический режим.

С созданием крупных водохранилищ в связи с уменьшением скоростей течения и образованием застойных зон создаются условия для седиментации аллохтонных и автохтонных взвешенных частиц. В результате формируются донные отложения, мощность, которых зависит от времени существования водохранилищ, интенсивности процессов разложения и минерализации органических веществ, гидрологических условий [2]. Донные отложения, как неотъемлемая часть водной экосистемы, являются важным фактором вторичного эвтрофирования водохранилища, регулируя поступление в воду биогенных и загрязняющих веществ и активизируя процессы цветения воды.

Основными причинами заиления являются наносы, поступающие вместе с речным стоком и с территории водосбора, ветровой перенос летучих песков с суши, выпадение в осадок химических соединений, биомасса водной растительности, абразия берегов [6]. Вклад того или иного фактора в динамику заиления водохранилищ обусловлен прежде всего типом водохранилища, его гидравликой, характеристиками водосбора и климатом.

Существующие в настоящее время методы расчета заиления водохранилищ, как правило, дают лишь общую оценку условно равномерного заполнения водохранилища речными наносами. Эти методы не учитывают сложную морфометрию водохранилищ, распределение поступившего с речным стоком твердого вещества по всей акватории водохранилища и его внутригодовую динамику, обусловленную изменением водности в течение года, регулированием стока водохранилища, влиянием ветра и ледовых явлений, осыпание берегов, образование органического осадка и так далее.

В связи с этим оценка динамики заиления водохранилищ должна быть основана на гидродинамических уравнениях взвесенесущих

водных масс и учитывать основные факторы, определяющие этот процесс.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА И МАТЕРИАЛЫ

Математическое моделирование заиления водохранилищ позволяет не только оценивать динамику отметок дна при текущих гидродинамических условиях, но и давать прогнозы при изменении условий формирования жидкого и твердого стока на водосборе, вызванного различными антропогенными мероприятиями. Также важно заметить, что при математическом моделировании предполагается непрерывная взаимосвязь между изменением морфометрических характеристик котловины водохранилища и переменными состояниями водной массы.

В качестве примера гидродинамической модели водохранилища можно привести модель, разработанную А.В. Рахубой в институте Экологии Волжского бассейна РАН. Эта модель основана на системе уравнений «мелкой воды» [4]:

Уравнения количества движения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - lv = F_x, \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + lv = F_y. \end{aligned} \quad (1)$$

Преобразованное уравнение сохранения массы, с учетом кинематических условий на свободной поверхности и на дне:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} = w, \quad z = \zeta; \quad (2)$$

$$u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} + w = 0, \quad z = -h; \quad (3)$$

и проинтегрированное по глубине будет иметь вид:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial [(h+\zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial [(h+\zeta)v]}{\partial y} = 0, \quad (4)$$

где $u(x,y,t)$ и $v(x,y,t)$ – усредненные по глубине продольная и поперечная скорости, $h(x,y,t)$ – невозмущенная глубина, $\zeta(x,y,t)$ – уровень на свободной поверхности, $H=(h+\zeta)$ – полная глубина, g – ускорение свободного падения, $l = 2\omega \sin\varphi$ – параметр Кориолиса, $\omega = 2\pi/\text{сут}$ – угловая скорость вращения земли, φ – географическая широта.

Компоненты внешней силы F_x и F_y учитывают касательные напряжения, связанные с ветром и донной поверхностью, а также горизонтальный турбулентный обмен:

$$F_x = c_a \frac{\rho}{\rho H} W_{(x)} |W| - \frac{f_{дно}}{H} u \cdot |v| + K_L \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial x}, \quad (5)$$

$$F_y = c_a \frac{\rho}{\rho H} W_{(y)} |W| - \frac{f_{дно}}{H} v \cdot |v| + K_L \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P_a}{\partial y}. \quad (6)$$

Для касательного напряжения ветра: c_a – безразмерный коэффициент аэродинамического сопротивления водной поверхности, $\rho_a/\rho = 0,001$ – отношение плотностей воздуха и воды; $W_{(x)}$ и $W_{(y)}$ – компоненты составляющей скорости ветра, W – результирующий вектор скорости ветра.

Для касательного напряжения обусловленного трением о донную поверхность: v – результирующий вектор скорости течения, $f_{дно} = g/C^2$ – безразмерный коэффициент придонного трения, g – ускорение свободного падения, C – коэффициент Шези.

Горизонтальный турбулентный обмен задается коэффициентом K_L , а изменение атмосферного давления задается P_a .

Уравнения решаются при задании следующих граничных условий для u , v , ζ . На твердых боковых границах нормальная компонента скорости u_n равна нулю. Для тангенциальной компоненты u_τ вводится квадратичный закон трения, аналогичный придонному. Таким образом, граничное условие на твердых боковых границах имеет вид

$$u_n = 0, \quad K_L \frac{\partial u_\tau}{\partial n} = -f_b u_\tau V, \quad (7)$$

f_b – безразмерный коэффициент бокового трения.

На открытых боковых границах одним из граничных условий является равенство нулю касательной к границе составляющей скорости: $u_\tau = 0$, второе граничное условие может быть разных типов. Для первого типа задается нормальная компонента скорости как функция времени: $u_n =$

$f(t)$. Для второго типа задается уровень воды: $\zeta = \zeta(t)$. Для третьего типа задается линейная зависимость между нормальной компонентой скорости и уровнем $u_n = \pm(g/h)^{1/2} \zeta$.

Численно реализованная в программной среде «ВОЛНА» [4], система гидродинамических уравнений позволяет оптимально рассчитывать характеристики движения воды с учетом ветрового воздействия в расчетной области, максимально приближенной к реальной конфигурации водного объекта.

Приведенные выше уравнения дополняются аналитической формулой расхода наносов

$$G = \frac{\rho_{грунта}}{\rho_{грунта} - \rho_{воды}} Q \left[\frac{c}{Hg} - (1-f)\rho_{воды} I \right], \quad (8)$$

где G – расход наносов, кг/с; Q – расход воды, м³/с; $\rho_{грунта}$ и $\rho_{воды}$ – плотности грунта и воды соответственно, кг/м³, g – ускорение свободного падения, м/с²; I – уклон дна; H – глубина потока, м; f – коэффициент внутреннего трения, б/р; c – сцепление частиц грунта при сдвиге, кг/(м·с²). Формула (1) является следствием основного уравнения движения воды и твердого вещества, выражающего баланс сил, действующих в системе «водный поток – донные отложения – наносы» [7]. Формула не имеет эмпирических параметров и апробирована на достаточно большом количестве водотоков, лежащих в различных физико-географических зонах и имеющих разные гидравлические и морфологические характеристики [7].

Совместное решение представленных выше уравнений и аналитической формулы расхода наносов позволяет вычислить изменения морфометрических характеристик ложа водохранилища. При изменении гидравлики 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, характеризующейся размером ячейки.

Представленная модель легла в основу расчетов изменения отметок дна приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища, вызванных влиянием неустойчивого режима стока.

Куйбышевское водохранилище (нижнюю его часть часто называют Жигулёвским морем) – самое крупное на реке Волге водохранилище, третье в мире по площади. Возникло в 1955 – 1957 гг. после завершения строительства плотины Жигулевской ГЭС, перегородившей долину Волги в Жигулях у города Ставрополь (ныне Тольятти). Подпор уровня воды у плотины 29 м, он распространяется по Волге до города Новочебоксарска, по реке Каме – до города Набережные Челны. Крупные заливы водохранилища образует по долинам Камы,

Свияги, Казанки и другим рекам. Основное назначение водохранилища – выработка электроэнергии, улучшение судоходства, водоснабжение, ирригация [3].

Расчет заиления приплотинной части Куйбышевского водохранилища основан на совместном решении системы гидродинамических уравнений (1-7), приведенных выше, и формулы расхода наносов (8). Акватория приплотинной части Куйбышевского водохранилища была разбита на 10268 расчетных узлов прямоугольной сетки с шагом 200 м. Модельный шаг по времени составил 3 с. Вычисления проводились по данным наблюдений за расходом воды в створе плотины Куйбышевского водохранилища за 2001 г. в период с 15 апреля по 7 августа.

Моделирование было проведено для следующих основных режимов:

1. Стационарный режим расчета, который позволил верифицировать параметры гидродинамической модели и аналитической формулы расхода наносов. Относительное

отклонение между рассчитанными по формуле (8) и наблюдаемыми расходами наносов в нижнем течении р. Волги составило 45%. Параметры формулы присвоены значения $c=2,7 \text{ кг}/(\text{м}\cdot\text{с}^2)$ и $f=0,95$.

2. Нестационарный режим расчета в период весеннего половодья и части летней межени. По результатам расчета были выделены основные фазы гидрографа различной продолжительности – подъем половодья, период высокой воды, спад и межень. Для этих периодов были рассчитаны для каждой расчетной точки аккумуляция и размыв.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты расчета отложения и размыва дна показали, что основной вклад в размыв вносит период подъема воды, а в намыв – период спада (рис. 1). Приводя рассчитанные данные о размыве и намыве к продолжительности каждого из четырех выделенных периодов, и пересчитав в толщину залегания, получим, что в мелководной зоне величина отложения за расчетный период составила 5 мм.

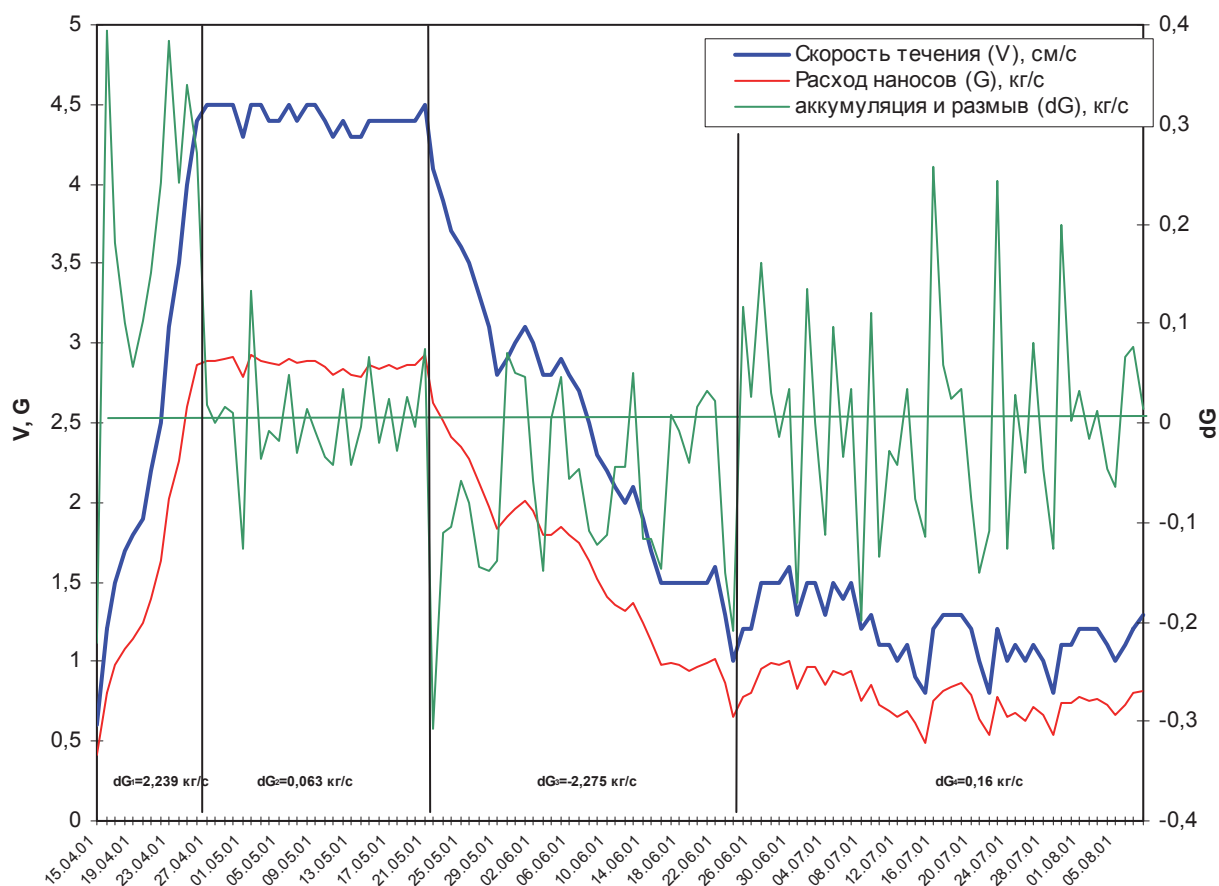


Рис. 1. Результаты расчета переменных состояния водохранилища (скорости течения и расхода наносов) и отложения и размыва дна в узле расчетной ячейки, расположенной в мелководной зоне

На рис. 2 приведены карты размыва (слева) и намыва (справа) за периоды подъема и спада половодья. Размывающая способность течений

достаточно велика. Максимальный размыв приходится на глубоководную зону в районе Климовского сужения и приплотинную зону

водохранилища, и составляет 41,5 кг/с. Данные натурных исследований по наносом Куйбышевского водохранилища, представленные в работе [5] подтверждают явление смыва продуктов заиления в период весенней пульсации скоростей стокового течения.

На спаде половодья скорость стокового течения снижается, усиливая аккумулялирующую способность водохранилища, которая также приходится на глубоководные районы. Максимальный намыв здесь составляет 42,4 кг/с. В мелководных зонах Куйбышевского

водохранилища размыв и аккумуляция за счет действия стокового течения незначительны и изменяются в диапазоне от 0 до 0,2 кг/с. Таким образом, модельные расчеты показывают, что неустановившийся режим на Куйбышевском водохранилище способствует неравномерному распределению донных отложений. Полученные результаты в среднем соответствуют интенсивности заиления Куйбышевского водохранилища речными наносами – 8–9 мм/год [5].

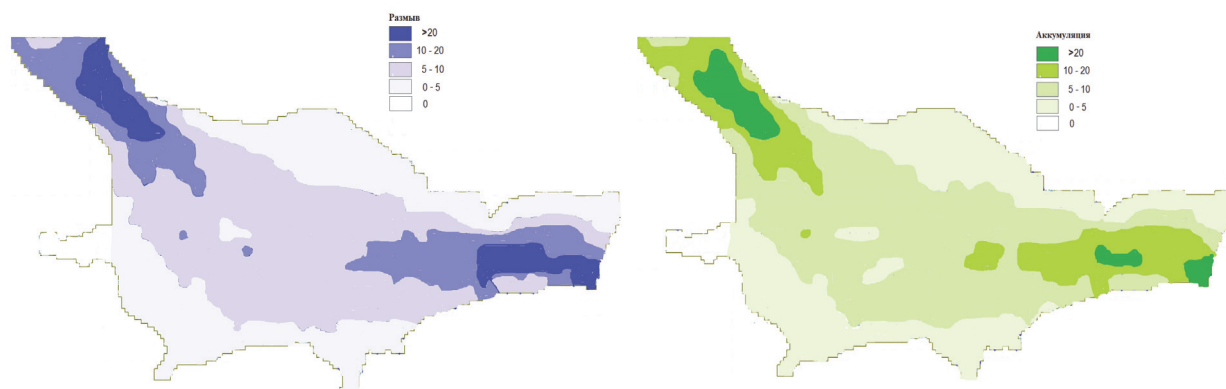


Рис. 2. Карты размыва (слева) и намыва (справа) за периоды подъема и спада половодья, кг/с

Величина вторичного эвтрофирования водохранилища определяется интенсивностью деструкционных процессов фосфоросодержащих веществ на поверхности донных отложений и скоростью накопления и размыва осадочного материала в условиях регулирования стока. Поступление фосфора из донных отложений в водную толщу распределено по площади акватории водохранилища также неравномерно. Следует отметить, что максимальное выделение фосфора донными отложениями приходится на левобережную и правобережную мелководные части приплотинного плеса и связана с менее интенсивными процессами гидродинамического размыва. В глубоководных частях водохранилища процессы размыва и намыва идут более интенсивно, что сдерживает формирование постоянного сорбционного осадочного слоя. Данные натурных наблюдений за поступлением фосфора, приведенные в работе [1] показывают, что на мелководных участках максимальная величина поступления фосфора из донных отложений составляет $31,1 \text{ мгP/ м}^2 \cdot \text{сут}$, тогда как в глубоководных – $9,4 \text{ мгP/ м}^2 \cdot \text{сут}$. В результате, неравномерное заиление ложа водохранилища влияет на пространственную неоднородность содержания фосфора в воде и вызывает наиболее

интенсивные процессы цветения воды в прибрежных мелководных районах.

ВЫВОДЫ

При изучении условий формирования динамики заиления крупных водохранилищ наряду с особенностями морфологии котловины и характером обрушения берегов большое значение имеет оценка гидродинамической активности водных масс, которая связана с неустановившимся режимом стока. В данной работе на основе модельных экспериментов был исследован режим взвешенных наносов и пространственная изменчивость донных отложений приплотинного плеса Куйбышевского водохранилища. В результате расчетов получены карты аккумуляции/размыва приплотинной части Куйбышевского водохранилища в различные фазы гидрографа – на подъеме половодья, в период большой воды, на спаде половодья и в летнюю межень. Наиболее интенсивные процессы переформирования дна приходятся на места руслового сужения, что объясняется резким изменением пропускной способности русла. Пространственная неравномерность заиления ложа водохранилища непосредственным образом влияет на величину поступления фосфора из донных отложений и неоднородное его распределение по акватории. Максимальное

поступление фосфора в водную толщу приходится на мелководные районы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Варламова О.Е.* Роль донных отложений в евтрофировании Куйбышевского водохранилища // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 3, № 2, 2001. С. 351-357.
2. *Денисова А.И., Нахшина Е.П., Новиков Б.И., Рябов А.К.* Донные отложения водохранилищ и их влияние на качество воды. Киев: Наук. думка, 1987. 164 с.
3. *Лукин А.В.* Куйбышевское водохранилище // Изв. ГосНИОРХ. Т.Л. 1961
4. *Рахуба А.В.* Гидроэкологические исследования водных объектов с использованием измерительно-вычислительной системы «Хитон – Волна» // Информационно-вычислительные технологии и их приложения. – Пенза: РИО ПГСХА, 2012. С. 64-68.
5. *Ступишин А.В., Трофимов А.М., Широков В.М.* Географические особенности формирования берегов и ложа Куйбышевского водохранилища. Казань, 1981. 184 с.
6. *Шамов Г.И.* Заиление водохранилищ. М–Л: Гидрометеиздат, 1939, 139 с.
7. *Шмакова М.В.* Теория и практика математического моделирования речных потоков. СПб: Изд. Лема, 2013. 144 с.

MATHEMATICAL MODELING OF THE DYNAMICS OF SEDIMENTATION AS A FACTOR IN EUTROPHICATION OF THE WATER MASSES OF THE KUIBYSHEV RESERVOIR

© 2015 A.V. Rakhuba¹, M.V. Shmakova²

¹ Institute of Ecology of the Volga river Basin RAS, Toliatti

² Institute of Limnology RAS, Sankt-Petersburg

In the study of the dynamics of the formation conditions of the underwater topography of large reservoirs along with the morphology of the basin and the nature of the collapse of the coast of great importance score hydrodynamic activity of water masses, which is associated with regulation of the flow regime. In this paper, based on model experiments investigated the spatial variability of sediment distribution and heterogeneity of phosphorus in Kuibyshev Reservoir the in the deep-water area near the dam.

Key words: mathematical model, bottom sediments, eutrophication, hydrodynamic regime.