

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 556.551

ОЦЕНКА СТРУКТУРЫ БАЛАНСА МИНЕРАЛЬНОГО ФОСФОРА В МОЖАЙСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ

Ю. С. Даценко, В. В. Пуклаков, К. К. Эдельштейн

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Россия

На основе результатов расчета 55-летних изменений минерального фосфора в Можайском водохранилище рассматриваются особенности структуры его баланса в годовом аспекте и в период весеннего наполнения. Представлена схема процессов, моделируемых в имитационной модели, и общее расчетное уравнение концентраций минерального фосфора. Рассматриваемые составляющие баланса фосфатов включают поступление фосфора из донных отложений при возникновении условий аноксии в придонных слоях водохранилища, поступление фосфора в результате метаболизма фитопланктона, зоопланктона, рыб, поступление фосфора в результате минерализации растворенного органического вещества, сброс фосфора в нижний бьеф водохранилища, поступление фосфора в донные отложения в результате сорбции и соосаждения, потребление фосфора в процессе фотосинтеза фитопланктона. Установлено соотношение внешних и внутренних потоков минерального фосфора и выявлено доминирующее влияние поступления фосфатов с речным стоком на величину его аккумуляции в водохранилище. Проанализированы различия рассмотренных составляющих баланса фосфатов в отдельные фазы водного режима водохранилища. Выделены особенности колебаний запаса фосфатов и основных составляющих его баланса в период наполнения водохранилища. Величина максимальных запасов фосфатов колебалась в пределах 8,3–54,9 тонны при среднем значении 22,9 тонны. Линия тренда максимального содержания фосфатов весной с момента создания водохранилища по настоящее время имеет вид параболы, максимум которой приходится на конец 1990-х годов. Показано, что изменение запаса минерального фосфора в водохранилище контролируется последовательными изменениями его притока, седиментации и потребления фитопланктоном.

Ключевые слова: водохранилище; минеральный фосфор; седиментация; фитопланктон; баланс фосфора; половодье.

Yu. S. Datsenko, V. V. Puklakov, K. K. Edelstein. ESTIMATION OF THE MINERAL PHOSPHORUS BALANCE STRUCTURE IN THE MOZHAISK STORAGE RESERVOIR BASED ON THE RESULTS OF MODEL CALCULATIONS

Based on the results of the calculation of 55-year-long changes in mineral phosphorus in the Mozhaisk storage reservoir, the structure of its balance over the annual cycle and during the spring refill are considered. The flowchart of the processes modeled in the simulation model and the general equation for calculating mineral phosphorus concentrations are presented. The components of the phosphate balance studied here are phosphorus influx from bottom sediments during anoxic conditions near the bottom, phosphorus influx resulting from the metabolism of phytoplankton, zooplankton and fish, phosphorus influx as a result of dissolved organic matter mineralization, phosphorus discharge to the reservoir's tailwaters, phosphorus intake in bottom sediments as a result of sorption and co-deposition, phosphorus consumption during phytoplankton photosynthesis. The ratio of external and internal mineral phosphorus flows was determined, and the dominant influence of phosphate inflow with river runoff on the amount of its accumulation in the reservoir was revealed. Variations of the above components of the phosphate balance across phases of the reservoir's water regime were analyzed. The patterns in the fluctuations of the phosphate stock and the main components of phosphorus balance during the refill period are highlighted. The maximum phosphate storage ranged from 8.3 to 54.9 tons, with an average at 22.9 tons. The trend line for the maximum content of phosphates in spring since the initial filling of the reservoir until now has the form of a parabola with the maximum in the late 1990s. It is shown that the change of the mineral phosphorus stock in the reservoir is controlled by serial changes in inflow, sedimentation and consumption by phytoplankton.

Keywords: storage reservoir; mineral phosphorus; sedimentation; phytoplankton; phosphorus balance; flood.

Введение

В методологии гидрохимических исследований для оценки влияния водохранилищ на химический сток и формирование качества воды доминирует подход вещественных балансов, состоящий в сопоставлении приходных и расходных статей баланса химических веществ в годы разной водности [Эдельштейн, 1998]. Этот способ оценки весьма трудоемок из-за необходимости тщательного учета всех составляющих вещественного баланса экосистемы водоема, чего можно достигнуть лишь учащенными в пространстве и времени комплексными наблюдениями в течение всего гидрологического цикла [Моделирование..., 1995; Гидроэкологический..., 2015]. Соотношения составляющих баланса весьма изменчивы в зависимости от гидрометеорологических особенностей отдельных лет, поэтому многолетние обобщения структуры баланса позволяют выявить доминирующие процессы, определяющие величину запаса вещества в водоеме. Особенно важны такие балансы для биогенных веществ, поскольку их запас в водоеме является тем фоном, который определяет интенсивность продукционных процессов в вегетационный период. Из биогенных веществ в центре внимания лимнологов уже давно находится фосфор, кру-

говорот которого в большинстве пресноводных экосистем лимитирует первичную продукцию водоема и процесс эвтрофирования. В 1984 г. на Можайском водохранилище были проведены детальные наблюдения за режимом минерального фосфора и выполнен балансовый расчет фосфороудерживающей способности его экосистемы [Моделирование..., 1995].

Для расчета полного баланса вещества, составляемого с учетом внутриводоемных процессов, необходимы количественные оценки потоков химических веществ, возникающих непосредственно в водной массе водохранилища в течение времени ее пребывания в водоеме. При невозможности достоверно оценить интенсивность этих потоков в природных условиях используются расчеты по гидроэкологическим моделям, воспроизводящим особенности внутриводоемного круговорота веществ и продукционных процессов в экосистеме водоема. В этом случае появляется возможность увеличить длительность анализируемых рядов составляющих фосфорного баланса.

Материалы и методы

Для анализа многолетних особенностей режима фосфора и основных гидрологических факторов, его определяющих, исполь-

зована математическая двумерная боксовая гидроэкологическая модель водохранилища ГМВ-МГУ.

Опыт применения этой модели для расчетов гидрологического режима различных водохранилищ Московского региона за отдельные годы показал вполне удовлетворительные результаты при условии тщательной подготовки (проверки на репрезентативность и достоверность) необходимых для расчетов исходных данных [Эдельштейн и др., 2005; Даценко и др., 2011].

Алгоритм модели представляет собой термогидродинамическую основу для расчетов режима гидрохимических и гидробиологических характеристик состава воды в водохранилище, концентрации которых изменяются под влиянием комплекса физико-химических, химических и биохимических процессов. Внутриводоемные изменения характеристик качества воды рассчитываются в экологическом блоке модели после того, как выполнены расчеты их изменений процессами внешнего и внутреннего водообмена. Расчет характеристик состава воды и биоты производится по уравнениям баланса массы в соответствии с концептуальными схемами взаимосвязей этих компонентов водной экосистемы [CE-QUAL-R1..., 1986]. Структура

модели и верификация выполненных по ней гидроэкологических диагностических расчетов детально изложена в монографии [Гидроэкологический..., 2015].

Эмпирические параметры, используемые в этой модели и не являющиеся универсальными, заимствованы из работы [CE-QUAL-R1..., 1986], в которой приводятся диапазоны изменчивости необходимых для выполнения расчетов параметров и рекомендованные значения. Эти значения в дальнейшем корректировались по результатам гидролого-гидрохимических съемок московских водохранилищ. Наиболее полная валидация модели была выполнена по материалам учащенных наблюдений за пространственно-временным распределением фосфатов на Можайском и Учинском водохранилищах. По данным съемок Можайского водохранилища, значения Тила колебались по сезонам года в диапазоне 0,18–0,39, а по различным участкам водохранилища – 0,25–0,38, соответствуя удовлетворительной оценке результатов моделирования [Даценко и др., 2012]

Схема процессов, учитываемых в расчете концентрации реактивного (потребляемого растениями) растворенного минерального фосфора (РМФ), представлена на рис. 1.

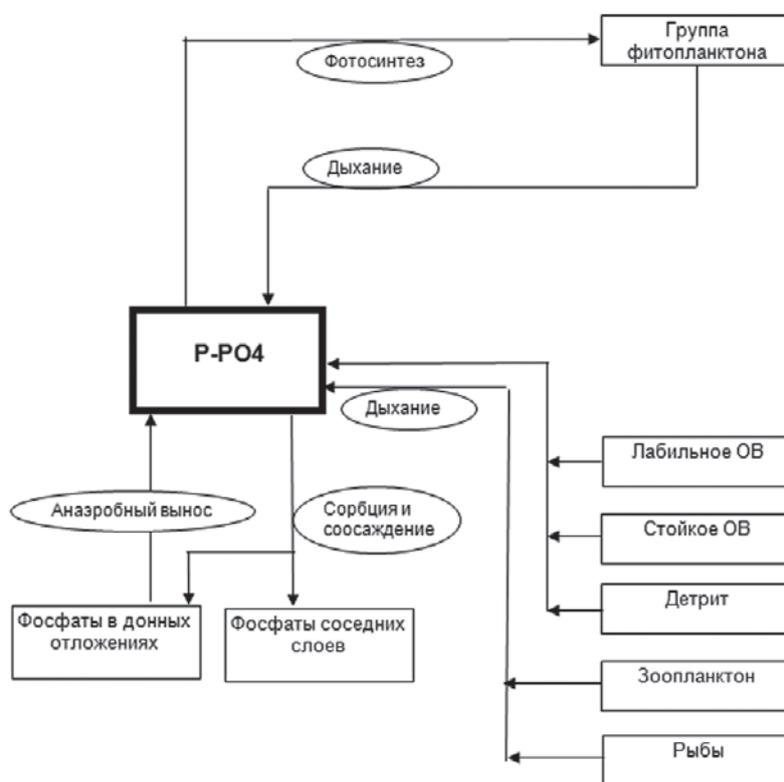


Рис. 1. Схема процессов при расчете режима фосфатов в модели ГМВ-МГУ

Fig. 1. Process flow diagram for calculating the phosphate regime in the GMV-MSU model

Общее уравнение баланса массы фосфатов имеет вид:

$$\frac{dC_P}{dt} = (K_{ar} - K_{ag}) \cdot \delta_P \cdot B_a + K_D \cdot \delta_P \cdot \gamma_{om} \cdot C_D + K_{DOM} \cdot \delta_P \cdot \gamma_{om} \cdot C_{DOM} + K_{RFR} \cdot \delta_P \cdot \gamma_{om} \cdot C_{RFR} + K_Z \cdot B_Z \cdot \delta_P + K_F \cdot B_F \cdot \delta_P + S_{od} \cdot F_d / V - \frac{P_P (\omega_{ss} \cdot C_{ss} + \omega_D \cdot C_D + \omega_{Fe} \cdot C_{Fe} + \omega_{Mn} \cdot C_{Mn}) \cdot C_P}{\Delta z},$$

где C_P – концентрация фосфатов, мг P/л; $\delta_P = 0,004$ – стехиометрический коэффициент фосфора; B_a, B_Z, B_F – биомасса фитопланктона, зоопланктона, рыб, мг/л; K_{ag} – скорость роста фитопланктона, 1/сут; $K_{ar}, K_Z, K_F, K_D, K_{DOM}, K_{RFR}$ – скорость выделения фосфатов в результате дыхания фитопланктона, зоопланктона, рыб и разложения детрита, лабильного органического вещества, стойкого органического вещества, 1/сут; γ_{om} – температурный коэффициент для процессов разложения органического вещества и детрита; $S_{od} = 0,021$ – скорость выноса фосфатов из донных отложений в анаэробных условиях, г P/(м² сут); F_d – площадь донных отложений в пределах расчетного бокса, м²; V – объем бокса, м³; $\omega_{ss} = 0,1, \omega_D = 0,35, \omega_{Fe} = 0,34, \omega_{Mn} = 0,34$ – скорость осаждения неорганических взвесей, детрита, нерастворимых соединений железа и марганца, м/сут; $C_{ss}, C_D, C_{Fe}, C_{Mn}, C_{DOM}, C_{RFR}$ – концентрация неорганических взвесей, детрита, окисленного железа, четырехвалентного марганца, лабильного органического вещества, стойкого органического вещества соответственно, мг/л; $P_P = 35$ – коэффициент адсорбции, м³/г; Δz – толщина расчетного бокса, м.

Расчеты концентраций фосфатов проводились для Можайского водохранилища – типич-

ного долинного водохранилища, осуществляющего многолетнее регулирование стока верхнего участка р. Москвы. Балансы минерального фосфора рассчитаны за 55 лет (1961–2015) эксплуатации этого водохранилища.

Результаты и обсуждение

В соответствии с концептуальной схемой круговорота РМФ в модели последовательно рассчитывались следующие составляющие внешнего и внутреннего баланса РМФ:

- поступление фосфора в водоем с речными водами, боковым притоком, перекачкой из Колоцкого водохранилища,
- поступление фосфора из донных отложений при возникновении условий аноксии в придонных слоях водохранилища,
- поступление фосфора в результате метаболизма фитопланктона, зоопланктона, рыб,
- поступление фосфора в результате минерализации растворенного органического вещества,
- сброс фосфора в нижний бьеф водохранилища,
- поступление фосфора в донные отложения в результате сорбции и соосаждения,
- потребление фосфора в процессе фотосинтеза фитопланктона.

Расчитанные (в тоннах) ежесуточные потоки этих составляющих баланса для всего водохранилища суммировались, и определялись годовые балансы минерального фосфора за весь период расчета. Осредненные за многолетний период значения составляющих фосфорного баланса Можайского водохранилища представлены на рис. 2.

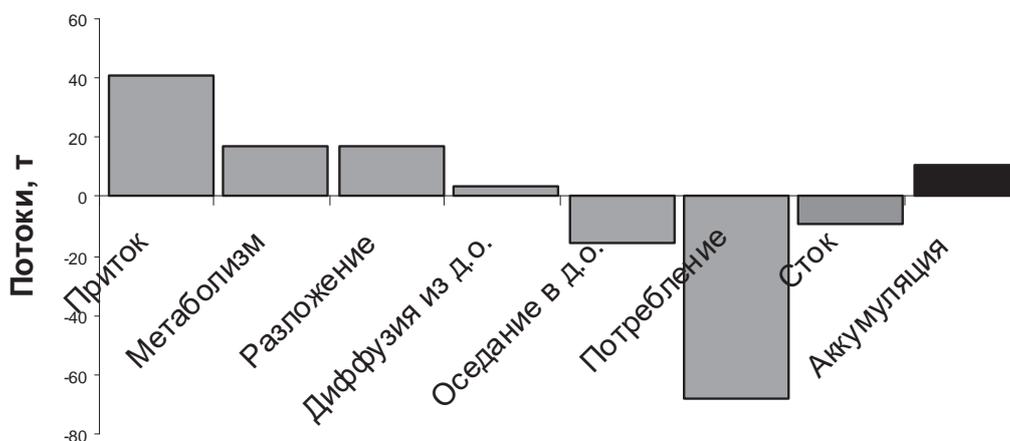


Рис. 2. Среднемноголетние потоки составляющих баланса минерального фосфора в Можайском водохранилище по данным модельных расчетов

Fig. 2. Average annual flows of mineral phosphorus balance components in the Mozhaisk storage reservoir according to model calculations

Рассматриваемые составляющие фосфорного баланса можно разделить на внешние (приток и сброс из водохранилища) и внутренние, потоки которых связаны с процессами метаболизма водных организмов и обменными процессами на границе донных отложений.

В приходной части внешнего баланса РМФ преобладает приток с речными водами, значительно превышающий сброс фосфора в нижний бьеф. Межгодовые колебания речного притока РМФ изменяются в диапазоне 20–100 т и зависят от гидрометеорологических условий года. Наименьшими значениями в приходной части баланса характеризуется поступление РМФ в результате его диффузии из донных отложений. Низкие значения этого потока обусловлены особенностями модельного расчета этой составляющей баланса фосфора. Поток создается только при возникновении аноксии в придонных слоях водохранилища. Аноксия в придонных слоях в Можайском водохранилище в периоды стагнации в последние десятилетия наблюдается ежегодно, при этом объемы зон с отсутствием растворенного кислорода в различные сезоны и годы колеблются в зависимости от условий вертикального перемешивания и интенсивности потребления кислорода в придонных слоях. Однако аноксия, возникающая летом обычно в середине июля, наблюдается в нижней его части на больших глубинах. Площадь дна под бескислородными слоями по сравнению со всей площадью водоема сравнительно невелика, и общий для водохранилища поток РМФ из донных отложений оказывается небольшим. Кроме того, этот поток, по расчетам, существует относительно непродолжительное время, поэтому суммарный годовой вклад диффузии РМФ из донных отложений в баланс фосфора характеризуется невысокими значениями. Следует заметить, что при отсутствии модельного расчета потока фосфора в результате взмучивания роль составляющей баланса фосфора, связанной с влиянием донных отложений, может уменьшаться. Поток РМФ в донные отложения определяется сорбцией этой формы фосфора на взвешях и нерастворимых соединениях железа и марганца с последующим осаждением и намного превышает его диффузию из донных отложений. Эта расходная составляющая баланса в среднемноголетнем аспекте существенно превышает сброс РМФ в нижний бьеф.

Во внутренних потоках фосфора, связанных с жизнедеятельностью водных организмов, доминирует потребление РМФ на развитие фитопланктона. Часть потребленного фосфора возвращается в воду в процессе дыхания

и экскреции организмов, часть – в результате разложения детрита и аллохтонного органического вещества, и эти два потока соизмеримы по величине. Превышение величины потребления РМФ над суммой потоков выделения и разложения объясняется тем, что некоторая часть потребленного фосфора поступает в донные отложения и аккумулируется в водохранилище в результате осаждения фитопланктона и детрита. Так как скорости процессов метаболизма очень высоки (по оценкам, приведенным в специальной литературе, полный круговорот РМФ в водоемах происходит в течение нескольких минут), роль внешних потоков фосфора проявляется в основном в формировании некоторого фонового уровня концентраций РМФ, определяющего продукционные процессы. Колебания величин внутренних обменных потоков РМФ определяются зависящей от погодных условий интенсивностью продукционных процессов и характеризуются изменчивостью, близкой к изменчивости величин поступления фосфора с речным притоком.

Среднемноголетнее значение результирующей величины рассчитанных потоков РМФ, названной нами аккумуляцией, в Можайском водохранилище составила 26 % от величины его притока. Анализ факторов ежегодных величин аккумуляции показал, что наиболее значимое воздействие на эту величину оказывает величина годового притока фосфора (рис. 3).

Этот фактор уже учитывался ранее при расчете величины удержания фосфора в водохранилищах [Даценко, 2007].

Влияние гидрометеорологических особенностей отчетливо проявляется в изменении структуры и соотношения балансовых составляющих РМФ в отдельные фазы гидрологического режима водохранилища. Поэтому по многолетним данным были проанализированы различия рассмотренных составляющих баланса РМФ в отдельные фазы режима водохранилища. По многолетним данным характеристик водного баланса в каждый год выделялись следующие фазы: зимние паводки, зимняя межень, подъем половодья, спад половодья, летне-осенние паводки, летне-осенняя межень.

Внутренние потоки РМФ, связанные с обменными процессами и играющие столь значительную роль в годовом балансе фосфора, проявляются только в вегетационный период, с периода фазы спада половодья, когда в водохранилище начинается цветение диатомовых водорослей. Общая результирующая баланса РМФ (аккумуляция) достигает максимальных положительных значений в половодье, осо-

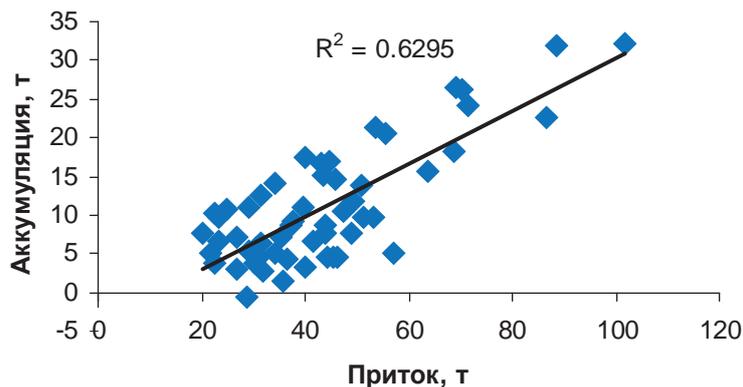


Рис. 3. Зависимость величины годовой аккумуляции РМФ от величины притока фосфора с речными водами

Fig. 3. Dependence of the annual accumulation of RMP on the amount of phosphorus inflow from river waters

бенно в фазу подъема, а в меженную фазу при небольшом притоке она становится даже отрицательной за счет седиментации. Незначительно колеблется по фазам величина диффузии из донных отложений, максимальная в период летней межени, и седиментация, закономерно повышающаяся в периоды подъема водного притока – в половодье и паводки.

Для формирования запаса минерального фосфора в водохранилище в предвегетационный период важнейшее значение имеет баланс фосфора в весенний период при наполнении водохранилища. В весенний период простран-

ственно-временные особенности распределения биогенных веществ в водоеме определяются сложным сочетанием гидрологических условий развития половодья и режима работы гидроузла при наполнении водохранилища.

Анализ многолетних рядов балансовых составляющих в весенний период показал, что в режиме фосфатов можно выделить несколько фаз: 1 – фаза интенсивного роста запасов; 2 – фаза их интенсивного снижения и 3 – фаза весенней стабилизации запасов. В таблице представлена структура баланса фосфатов в выделенные фазы.

Структура баланса фосфатов Можайского водохранилища за отдельные фазы весны

Structure of the Mozhaisk reservoir phosphate balance for individual spring phases

Период Period	Ед. измерения Units	Приход Inflow							Расход Outflow			
		Аккумуляция Accumulation	Приток с водосбора Inflow from the catchment	Жизнедеятельность фитопланктона Phytoplankton life	Жизнедеятельность зоопланктона Zooplankton life	Разложение органического вещества Decomposition of organic matter	Разложение детрита Detritus decomposition	Поступление из грунтов дна Inflow from bottom soils	Аккумуляция в береговой зоне Accumulation in the coastal zone	Сброс в нижний бьеф Outflow to the canal round	Седиментация Sedimentation	Производство фитопланктона Phytoplankton production
Фаза 1 Phase 1	тонн tons	20,2	22,6	0,0	0,0	0,3	0,0	0,1	-0,9	-1,0	-1,2	0,0
	%		97,7	0,0	0,2	1,4	0,0	0,7	29,4	27,2	41,7	1,7
Фаза 2 Phase 2	тонн tons	-17,1	3,8	4,5	0,1	0,9	0,0	0,0	-0,2	-2,6	-3,0	-16,1
	%		35,8	53,0	0,9	9,9	0,1	0,2	0,9	10,7	14,7	73,6
Фаза 3 Phase 3	тонн tons	-4,8	1,9	6,7	1,2	2,1	0,1	0,0	0,0	-0,8	-2,5	-11,0
	%		13,4	55,7	10,0	19,9	0,5	0,5	0,1	5,4	19,1	75,5

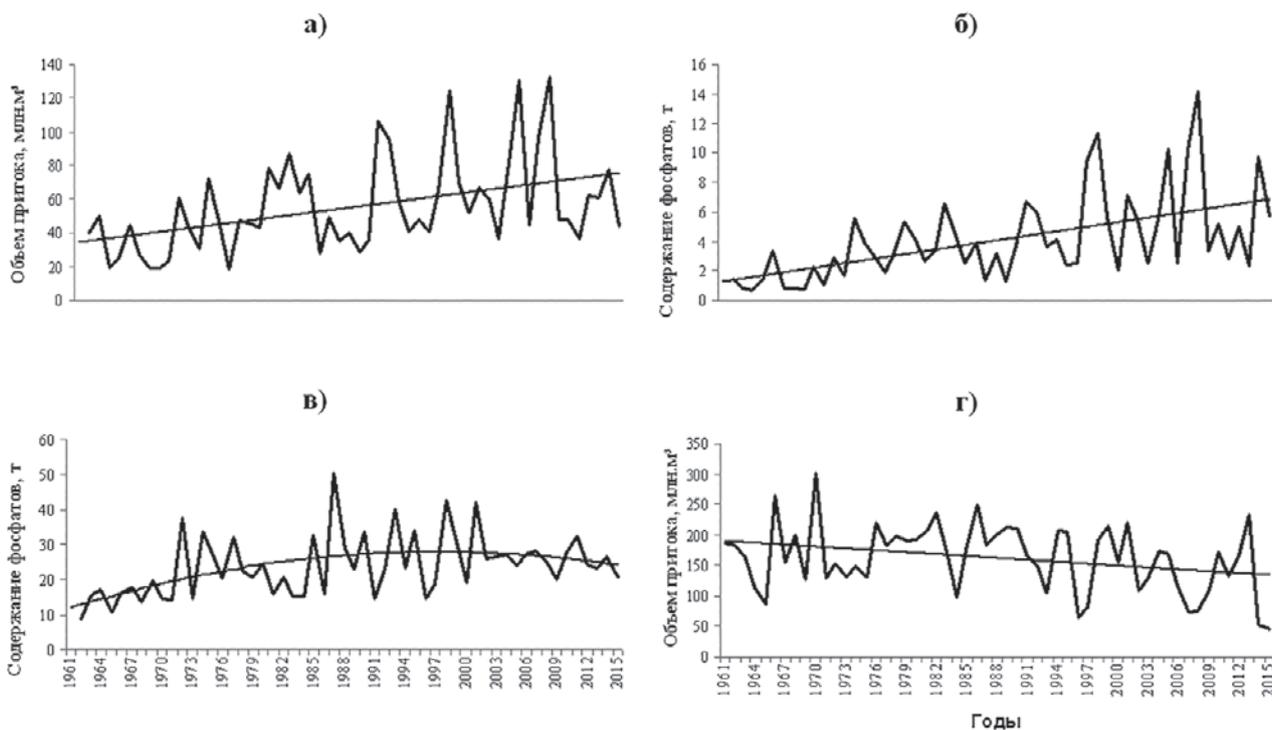


Рис. 4. Многолетняя изменчивость притока воды за зиму (а), притока воды за весеннее половодье (г), содержания фосфатов в конце зимы (б) и их максимального содержания в весенний период (в)

Fig. 4. Long-term variability of water inflow during the winter (а), water inflow during the spring flood (г), the content of phosphates at the end of winter (б) and their maximum content in the spring (в)

Разнообразие режимов наполнения водохранилища и гидрометеорологических процессов приводит к большой изменчивости режима запасов фосфатов в весенний период.

Перед началом весеннего наполнения в водохранилище обычно наблюдаются минимальные запасы воды и фосфатов. В целом за прошедшие 55 лет отмечается хорошо выраженный положительный линейный тренд объема зимнего притока воды (рис. 4, а), который показывает, что за это время зимний приток воды в водохранилище увеличился более чем в 2 раза (в среднем с 33,7 до 75,6 млн м³). Аналогичный тренд выявлен и для содержания фосфатов перед началом весеннего наполнения водоема (рис. 4, б), где наблюдается пятикратный рост содержания фосфатов (с 1,2 до 6,8 тонны). Количество фосфатов в водоеме в конце зимы тесно связано с объемом зимнего притока (коэффициент корреляции 0,826). Чем больше зимний приток воды, тем выше запасы фосфат-иона в водохранилище перед началом его весеннего наполнения. Обычно это бывает связано с мягкой зимой – корреляционное отношение объема зимнего притока со средней температурой воздуха в зимний период $r = 0,563$. Имеет место также отрицательная корреляционная связь между длительно-

стью зимы и запасами минерального фосфора в конце зимнего периода ($r = -0,260$), т. е. чем больше длительность зимы, тем меньше конечный зимний запас фосфора в водоеме, что связано с большей сработкой водохранилища.

С приходом речных вод половодья запасы фосфатов быстро пополняются (фаза 1 – интенсивный рост запасов), достигая своего максимума в среднем спустя неделю после прохождения пика половодья на реках водосборного бассейна. Однако при длительном подъеме половодья (холодная весна) максимум фосфатов в водоеме может сформироваться и до достижения пика половодья. И напротив, быстрый подъем половодья при последующем его медленном спаде приводит к тому, что максимум запаса фосфатов в водоеме может наступить на 2–3 недели позже прохождения пика половодья на реках. Изменчивость отклонения даты наступления максимума запасов фосфора в водохранилище от даты пика половодья очень высокая ($C_v = 0,86$).

В приходной части баланса фосфатов в это время доминирует (98 %) их поступление с речным притоком, в расходной части – седиментация фосфатов с минеральной взвесью (42 %, табл.).

В среднем максимум содержания фосфат-иона в водохранилище приходится на 18 апре-

ля. Диапазон изменения этой даты 22 марта – 9 мая. Величины максимальных запасов фосфатов колебались в пределах 8,3–54,9 тонны при среднем значении (50 % обеспеченности) 22,9 тонны и изменчивости ряда 38 %. Линия тренда максимального содержания фосфатов весной с момента создания водохранилища по настоящее время имеет вид параболы ($R^2 = 0,234$), максимум которой приходится на конец 90-х годов (рис. 4, в). Корреляция максимального содержания фосфатов с уровнем воды в водохранилище невысокая ($r = 0,284$), из чего следует, что наполненность водохранилища не является главным фактором весеннего накопления фосфатов в водоеме.

Изменение объема весеннего половодья с момента создания водохранилища по настоящее время имеет слабо выраженный отрицательный линейный тренд (рис. 4, г). Значимая корреляция объема половодья и максимальных запасов фосфора отсутствует ($r = 0,031$), т. е. объем половодья практически не влияет на максимальную величину весенних запасов фосфатов в водохранилище. Однако значимая корреляционная связь отмечена между максимальными запасами минерального фосфора и длительностью их накопления ($r = 0,472$). Следовательно, чем выше температура воздуха в начале весны и чем интенсивнее подъем половодья на реках водосбора, тем меньше в водоем поступает фосфатов с его водосбора. Скорее всего, это связано с тем, что при интенсивном развитии весенних процессов в реки поступает в основном поверхностный склоновый сток, содержание фосфатов в котором существенно меньше, чем в почвенном стоке завершающей фазы весны.

Максимум содержания фосфатов в водохранилище наступает, как правило, раньше момента его максимального весеннего наполнения (в среднем на 13 суток) при уровне воды в среднем на 64 см ниже максимального, т. е. снижение запаса фосфатов начинает происходить еще при продолжающемся заполнении водохранилища. На первом этапе это снижение (фаза 2 – интенсивное снижение запасов) происходит прежде всего в результате того, что поступление фосфатов с притоком рек начинает уступать процессам седиментации минеральной взвеси с адсорбированными на ней фосфатами. В ряде случаев (16 из 55 лет) к этому приводит увеличение сбросов воды в нижний бьеф водохранилища при ожидании большого притока воды с водосбора. Но наиболее сильное влияние на интенсивность уменьшения запасов фосфора оказывают активно потребляющие их весенние виды диатомовых водорослей,

развитие которых в это время в значительной степени контролируется температурным фактором. Пик весеннего развития фитопланктона приходится в среднем на 5 мая (что на 17 дней позже пика содержания фосфатов в водоеме) при диапазоне изменения 12 апреля – 30 мая и коэффициенте вариации $C_v = 8$ %. Коэффициент корреляции весеннего максимума биомассы ФП с максимумом содержания фосфора в водоеме весной очень высок и составляет $r = 0,799$.

В структуре баланса фосфатов в этот период происходят существенные изменения (табл.). В приходной части баланса практически в 3 раза снижается роль речного притока (с 98 до 36 %), на порядок возрастает роль разложения органического вещества. Доминирующим фактором пополнения запасов фосфора в водоеме становятся процессы жизнедеятельности фитопланктона (53 %). В то же время на рост биомассы фитопланктона приходится 74 % расходной части баланса фосфатов, а вклад седиментации и сработки водохранилища в снижение запасов фосфатов уменьшается почти в 3 раза.

После достижения максимума биомассы весеннего фитопланктона и начала его отмирания скорость снижения запасов фосфатов существенно замедляется (фаза 3 – стабилизация запасов). В гидрологическом режиме водохранилища этот период обычно характеризуется стабилизацией уровня воды на период нереста основных видов рыб водоема, поэтому в расходной части баланса фосфатов роль сбросов воды из водохранилища минимальна. Доминирует по-прежнему потребление фосфора на продукционные процессы (75 %) и седиментация фосфора, адсорбированного на взвешенных частицах (19 %). Роль речного притока, как и сбросов воды из водохранилища, в эту фазу минимальна, в приходной части баланса фосфора по-прежнему максимален вклад процессов жизнедеятельности фитопланктона (56 %), в 2 раза, до 20 %, возрастает вклад разложения органического вещества. Характерной особенностью этого периода является резкое возрастание в балансе фосфатов вклада процессов жизнедеятельности зоопланктона (с 1 до 10 %).

Весенний период в гидрологическом режиме водоема заканчивается, по существу, после пика фазы «чистой воды», которая совпадает с минимумом весенней биомассы фитопланктона. В Можайском водохранилище этот пик приходится в среднем на 1 июня при диапазоне изменения этой даты 11 мая – 22 июня и коэффициенте вариации $C_v = 7$ %. При этом корреля-

ляционная зависимость весеннего минимума биомассы фитопланктона от максимального содержания фосфатов в водоеме невысока ($r = 0,390$).

Заключение

Анализ полученных моделированием многолетних рядов запасов и составляющих баланса фосфатов в Можайском водохранилище позволил установить основные черты режима фосфатов. В среднемноголетнем аспекте в приходной части баланса доминирует приток фосфатов с речным стоком, в расходной – потребление их фитопланктоном. Соотношение составляющих баланса заметно изменяется в различные фазы гидрологического режима водохранилища.

Изменение запасов минерального фосфора в период заполнения водохранилища водами половодья характеризуется наличием фазы подъема, в которой доминирующую роль играет поступление фосфатов в водохранилище с водами притока, и фазы спада. Главной причиной снижения запасов фосфатов в начальной стадии спада становится седиментация сорбированных на взвешах фосфатов, а затем начинает доминировать поглощение фосфатов диатомовыми водорослями. Начало интенсивного поглощения фосфатов фитопланктоном определяется температурным режимом водохранилища в период его наполнения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 18-05-01066).

References

Datsenko Yu. S., Erina O. N., Puklakov V. V. Modelirovanie rezhima fosfora v stratifitsirovannom vodokhranilishche [Modeling the phosphorus regime in a stratified reservoir]. *Organicheskoe veshchestvo i biogennye elementy vo vnutr. vodoemakh i morskikh vodakh: Mat. V Seros. simp. s mezhdunar. uchastiem (Petrozavodsk, 10–14 sent. 2012 g.)* [Organic matter and biogenic elements in inland water bodies and marine waters: Proceed. V All-Russ. symp. with int. part. (Petrozavodsk, Sept. 10–14, 2012)]. Petrozavodsk, 2012. P. 379–382.

Datsenko Yu. S. Evtrofirovaniye vodokhranilishch. Gidrologo-gidrokhimicheskie aspekty [Reservoirs eutrophication. Hydrological and hydrochemical aspects]. Moscow: GEOS, 2007. 252 p.

Datsenko Yu. S., Puklakov V. V., Ershova M. G., Edel'shtein K. K. Ispol'zovanie gidrologicheskoi modeli dlya vosproizvedeniya ekologicheskogo sostoyaniya vodokhranilishch [Using a hydrological model to reproduce the ecological state of reservoirs]. *Resursy i kachestvo vod sushy: otsenka, prognoz i upravlenie* [Resour-

Литература

Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) // Под ред. К. К. Эдельштейна. М.: Перо, 2015. 286 с.

Даценко Ю. С., Ерина О. Н., Пуклаков В. В. Моделирование режима фосфора в стратифицированном водохранилище // *Органическое вещество и биогенные элементы во внутренних водоемах и морских водах: Матер. V Всерос. симп. с междунар. участием (Петрозаводск, 10–14 сентября 2012 г.)*. Петрозаводск, 2012. С. 379–382.

Даценко Ю. С., Пуклаков В. В., Ершова М. Г., Эдельштейн К. К. Использование гидрологической модели для воспроизведения экологического состояния водохранилищ // *Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление*. М.: ИВП РАН, 2011. С. 82–97.

Даценко Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: GEOS, 2007. 252 с.

Моделирование режима фосфора в долинном водохранилище / Под ред. К. К. Эдельштейна. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 80 с.

Эдельштейн К. К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: GEOS, 1998. 277 с.

Эдельштейн К. К., Даценко Ю. С., Пуклаков В. В. Экспериментальная оценка погрешности модельного расчета стратификации водной толщи в водохранилище // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География*. 2005. № 6. С. 20–24.

CE-QUAL-R1: A numerical one-dimensional model of reservoir water quality; User's manual. Instruction Report E-82-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station Environ. Laboratory, Vicksburg, Miss., 1986. 508 p.

Поступила в редакцию 03.03.2020

ces and terrestrial water quality: assessment, forecast, and management]. Moscow: IVP RAN, 2011. P. 82–97.

Edel'shtein K. K., Datsenko Yu. S., Puklakov V. V. Eksperimental'naya otsenka pogreshnosti model'nogo rascheta stratifikatsii vodnoi tolshchi v vodokhranilishche [Experimental assessment of the model error calculation of water stratification in a reservoir]. *Vestn. Mosk. un-ta. Ser. 5. Geografiya* [MSU Bull. Ser. 5. Geography]. 2005. No. 6. P. 20–24.

Edel'shtein K. K. Vodokhranilishcha Rossii: ekologicheskie problemy, puti ikh resheniya [Reservoirs of Russia: ecological problems and ways to solve them]. Moscow: GEOS, 1998. 277 p.

Gidroekologicheskii rezhim vodokhranilishch Podmoskov'ya (nablyudeniya, diagnoz, prognoz) [Hydroecological regime of the Moscow region reservoirs (observations, diagnostic, and forecast)]. Ed. K. K. Edelshtein. Moscow: Pero, 2015. 286 p.

Modelirovanie rezhima fosfora v dolinnom vodokhranilishche [Modeling the phosphorus regime in valley re-

servoires]. Ed. K. K. Edel'shtein. Moscow: Izd-vo Mosk. un-ta, 1995. 80 p.

CE-QUAL-R1: A numerical one-dimensional model of reservoir water quality; User's manual. Instruction Re-

port E-82-1, US Army Engineer Waterways Experiment Station Environ. Laboratory, Vicksburg, Miss., 1986. 508 p.

Received March 03, 2020

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Даценко Юрий Сергеевич

профессор каф. гидрологии суши географического факультета, старший научный сотрудник, д. г. н. Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: yuri0548@mail.ru
тел.: (495) 9395470

Пуклаков Валерий Владимирович

старший научный сотрудник, к. г. н. Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: puklakov@mail.ru
тел.: (495) 9395470

Эдельштейн Константин Константинович

профессор, старший научный сотрудник, д. г. н. Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Ленинские горы, 1, Москва, Россия, 119991
эл. почта: emek05@mail.ru
тел.: (495) 9395470

CONTRIBUTORS:

Datsenko, Yuri

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: yuri0548@mail.ru
tel.: (495) 9395470

Puklakov, Valery

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: puklakov@mail.ru
tel.: (495) 9395470

Edelstein, Konstantin

Lomonosov Moscow State University
1 Leninskie Gory, 119991 Moscow, Russia
e-mail: emek05@mail.ru
tel.: (495) 9395470