

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 556.574.5:546.16

БАЛАНС ФОСФОРА В ВОДОХРАНИЛИЩАХ СЕЗОННОГО И МНОГОЛЕТНЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Ю.С. Даценко¹, В.В. Пуклаков²

^{1,2} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра гидрологии суши*

¹ *Профессор, д-р геогр. наук; e-mail: yuri0548@mail.ru*

² *Ст. науч. сотр., канд. геогр. наук; e-mail: puklakov@mail.ru*

Представлены результаты модельной имитации режима и баланса фосфора в Ивановском, Можайском и Истринском водохранилищах, осуществляющих соответственно сезонное регулирование стока верхней Волги и многолетнее регулирование стока рек Москвы и Истры. Для расчета составляющих баланса фосфора использована двухмерная боксовая модель тепло- и массообмена (ТМО), позволяющая с суточным шагом рассчитывать пространственно-временное распределение параметров качества воды. Уравнение баланса фосфора включает члены, описывающие поступление фосфора по рекам и с бокового водосбора, регенерацию фосфора из донных отложений; седиментацию фосфора, сброс в нижний бьеф, удаление фосфора с водозабором в канал им. Москвы из Ивановского водохранилища, увеличение или уменьшение массы фосфора в воде водохранилища за годовой период. Расчеты проведены для среднего по водности года. Сравнительным анализом составляющих баланса фосфора в Ивановском и в подмосковных водохранилищах показано, что в Ивановском водохранилище более интенсивно происходят процессы седиментации и регенерации фосфора из грунтов. В водохранилище сезонное регулирование основного сброса фосфора в нижний бьеф осуществляется в период половодья, а в водохранилищах многолетнего регулирования – в период межени. Представлены графики зависимости величины удержания фосфора в водоеме от увеличения внешней фосфорной нагрузки, полученные по результатам модельных сценарных расчетов.

Ключевые слова: водохранилище, гидроэкологическое моделирование, фосфорная нагрузка, седиментация и регенерация фосфора

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.12

ВВЕДЕНИЕ

Изучение процессов трансформации соединений фосфора в водоемах уже давно находится в центре внимания лимнологов, поскольку этот элемент в большинстве случаев определяет процессы увеличения продуктивности экосистем и эвтрофирование водоемов. Начиная с простых полужемпирических моделей эвтрофирования, моделированию режима фосфора в водоемах посвящено немало специальных исследований, с разной степенью детальности описывающих сложные превращения различных форм этого элемента в процессе геохимического и биохимического круговорота в экосистеме водоема [Элементы круговорота..., 1987; Бикбулатов, 2009].

Достигнутый за последние годы прогресс в развитии методов исследования динамики экосистем водоемов основан на предположении о том, что состояние экосистемы в любой заданный момент

времени может быть выражено количественно, так что все изменения в ней могут быть математически формализованы. Таким образом, наиболее перспективной методологией описания поведения водных экосистем в настоящее время представляется математическое моделирование [Меншуткин, 2010; Страшкраба, Гнаук, 1989].

Имитационные расчеты по модели позволяют количественно оценить и проанализировать сложный комплекс внутриводоемных процессов, определяющих трансформацию фосфора в водохранилищах. Большое влияние на направленность, соотношение, интенсивность этих процессов и формирование запасов фосфора в водохранилище оказывает характер регулирования стока гидроузлом. Влияние особенностей режима регулирования на формирование запасов фосфора в водохранилище можно проследить путем сравнения результатов моделирования

сезонных изменений составляющих баланса в водохранилищах различного типа регулирования за один и тот же год.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В настоящей работе такое сравнение проведено на основе модельных расчетов в водохранилищах системы водоснабжения г. Москвы: Ивановском водохранилище сезонного регулирования на волжской системе и двух московских водохранилищах многолетнего регулирования – Можайском и Истринском, которые существенно отличаются от Ивановского по интенсивности внутреннего

водообмена. Основные гидрологические характеристики водохранилищ представлены в таблице [Эдельштейн, 1998].

Для расчета составляющих полного баланса фосфора использована двухмерная боксовая модель тепло- и массообмена (ТМО), позволяющая с точным шагом рассчитывать пространственно-временное распределение параметров качества воды [Puklakov, 1995; Гидроэкологический..., 2015]. Алгоритм расчета и примеры применения модели для изучения режима фосфора в долинном водохранилище подробно описаны в работе [Моделирование..., 1995].

Таблица

Гидрологические характеристики водохранилищ

Характеристика	Ивановское	Можайское	Истринское
Объем при НПУ, млн м ³	1120	235	183
Площадь зеркала при НПУ, км ²	316	30,7	33,6
Средняя глубина, м	3,5	7,7	5,4
Наибольшая глубина, м	19,0	22,5	20,0
Коэффициент водообмена, 1/год	8,3	1,15	1,26

Уравнение баланса минерального фосфора в имитационном расчете выглядит следующим образом

$$P_R + P_B + P_{REG} - P_{SED} - P_{GES} - P_K = \pm P_W, \quad (1)$$

где P_R – поступление фосфора по рекам, имеющим данные гидрометрических наблюдений; P_B – поступление фосфора по остальным рекам и с бокового водосбора; P_{REG} – регенерация фосфора из донных отложений; P_{SED} – седиментация фосфора; P_{GES} – сброс в нижний бьеф через водоводы гидроузла; P_K – удаление фосфора с водозабором в канал им. Москвы из Ивановского водохранилища; P_W – увеличение или уменьшение массы фосфора в воде водохранилища. Расчеты проведены для среднего по водности 1984 года.

Регенерация фосфора определяется его диффузией из донных отложений и выделением из разлагающейся органики и оседающего сестона. Эти процессы тесно связаны с глубиной залегания илов z и температурой воды T , поэтому скорость регенерации V_{REG} в модели вычисляется как

$$V_{REG} = k_1 \cdot \exp(k_2 \cdot z + k_3 \cdot T), \quad (2)$$

где k_1 – минимальная среднегодовая интенсивность регенерации фосфора в водоеме; k_2 и k_3 – калибровочные коэффициенты.

Основной фактор седиментации фосфора – его вынос из водной толщи с оседающим на дно биогенным органическим веществом. В водоеме с замедленным водообменом этот процесс описывается уравнением

$$C_{TP}(t + \Delta t) = C_{TP}(t) \cdot \exp(-k_0 \cdot C_{TP}(t) \cdot \Delta t), \quad (3)$$

где $C_{TP}(t + \Delta t)$ и $C_{TP}(t)$ – концентрация в воде общего фосфора (ТР) в начальный и конечный моменты расчетного периода; $k_0 = V_{SED}/SP_p$ – калибровочный коэффициент, отражающий скорость изменения содержания ТР в результате седиментации (здесь V_{SED} – скорость оседания взвешенных в воде частиц; SP_p – максимально возможная при данном содержании фосфора удельная плотность его потока ко дну).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Составляющие баланса фосфора в рассмотренных водохранилищах характеризуются следующими особенностями.

Внешняя фосфорная нагрузка. По сравнению с Можайским и Истринским водохранилищами среднегодовая интенсивность поступления общего фосфора с водосбора Ивановского водохранилища была в 1,7 раз выше, что связано, прежде всего, с его большей антропогенной нагрузкой, в частности

влиянием сточных вод г. Твери [Иваньковское..., 2000; Даценко, 2021]. Модуль стока фосфора с водосбора Иваньковского водохранилища составил $0,134 \text{ кг}/(\text{км}^2\text{сут})$. Величина годовой фосфорной нагрузки на водоем в результате притока с водосбора составила $1956 \text{ мг}/\text{м}^3$ против $221 \text{ мг}/\text{м}^3$ на Можайском водохранилище, т. е. в 9 раз больше. Несмотря на географическую близость расположения водосборов, режим поступления фосфора в Иваньковское водохранилище характеризуется более сглаженным ходом. Это определяется в первую очередь большими размерами водосбора Иваньковского водохранилища (более чем в 30 раз превышающими площадь водосбора Можайского водохранилища), его большей заболоченностью и зарегулированностью стока воды. Максимальная фосфорная нагрузка приходится на время весеннего половодья и летне-осенних паводков, а минимальная – на время летней и зимней межени.

Сброс фосфора в нижний бьеф. Вынос фосфора за пределы водохранилищ определяется особенностями диспетчерского графика их работы, интенсивностью водообмена и условиями селективного поступления воды в водозаборные отверстия гидротурбины. В 1984 г. в Иваньковском водохранилище, которое относится к водоемам сезонного регулирования с интенсивным водообменом, основное количество фосфора (50%) было сброшено в нижний бьеф и водозабор канала в течение трех месяцев – с апреля по июнь, т. е. во время пропуска через водохранилище водных масс весеннего половодья. В отличие от него в водохранилищах многолетнего регулирования максимальный сброс фосфора происходил во время летней и зимней межени. Это определяется в первую очередь режимом сработки Можайского и Истринского водохранилищ и селективностью забора воды из них во время существования устойчивой летней и зимней стратификации вод в приплотинных плесах.

Регенерация фосфора из донных отложений. Средняя интенсивность поступления фосфора из внутриводоемных источников (регенерация фосфора) в Иваньковском водохранилище оказалась в 2 раза выше, чем в подмосковных водохранилищах ($11,0$ против $5,5 \text{ кг}/(\text{км}^2\text{сут})$ в Можайском водохранилище). Скорее всего, это можно объяснить большей загрязненностью донных отложений Иваньковского водохранилища, накопившихся за время его эксплуатации с 1937 г. Обращает на себя внимание большая интенсивность регенерации в мае после весеннего заполнения Иваньковского водохранилища, значительно превышающая регенерацию фосфора в это же время в подмосковных водоемах (рис. 1). Возможно это связано с большим увеличением площади дна Иваньковского водохранилища в

результате весеннего затопления в 1984 г. и включения накопившегося там с осени органического вещества в круговорот общего фосфора в водоеме по сравнению с Можайским и Истринским водохранилищами. Площадь Иваньковского водохранилища увеличилась в результате весеннего заполнения более чем в 2,5 раза, а в подмосковных водохранилищах – всего лишь на 40–45%.

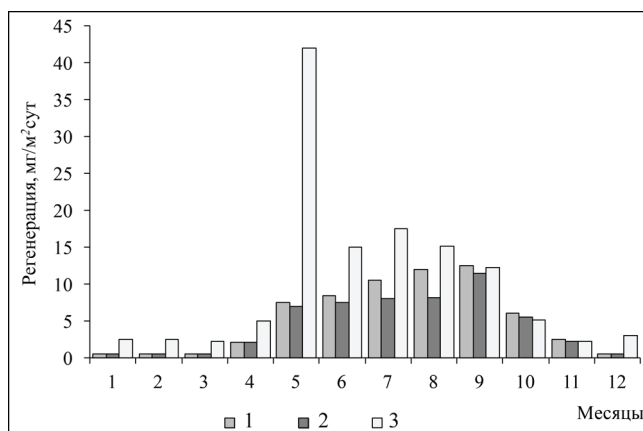


Рис. 1. Интенсивность регенерации общего фосфора в Истринском (1), Можайском (2) и Иваньковском (3) водохранилищах в 1984 г.

Fig. 1. The intensity of total phosphorus regeneration in the Istra (1), Mozhaisk (2) and Ivankovo (3) reservoirs in 1984

В то же время в приходной части баланса фосфора в Иваньковском водохранилище доля регенерации заметно ниже, чем в подмосковных водохранилищах (38 по сравнению с 58–62% соответственно). В итоге, суммарная фосфорная нагрузка, формирующаяся из суммарного притока фосфора с водосбора и его регенерации из донных отложений, в 1984 г. на Иваньковском водохранилище была в 6 раз выше, чем на Можайском и Истринском водохранилищах. Она составила соответственно 3151 , 520 и $528 \text{ мг}/\text{м}^3$ в год.

Седиментация фосфора. Модельная оценка интенсивности удаления общего фосфора из водной массы водохранилища без выноса его за пределы водоема (седиментации фосфора) показала, что в Иваньковском водохранилище в 1984 г. она была в среднем за год на 50% больше, чем в Можайском ($12,0$ и $8,0 \text{ кг}/(\text{км}^2\text{сут})$ соответственно). Максимум седиментации приходится на летний период с пиком в июне месяце (рис. 2), а в подмосковных водохранилищах – на весну с пиком в мае, т. е. сразу после весеннего наполнения водоемов. В целом, роль седиментационных процессов в расходной части баланса фосфора Иваньковского водохранилища в 2 раза меньше, чем в подмосковных водоемах (в нем на седиментацию приходится лишь 42% суммарного годового расхода фосфора, тогда как в Можайском водохранилище – 84, а в Истринском – 85%).

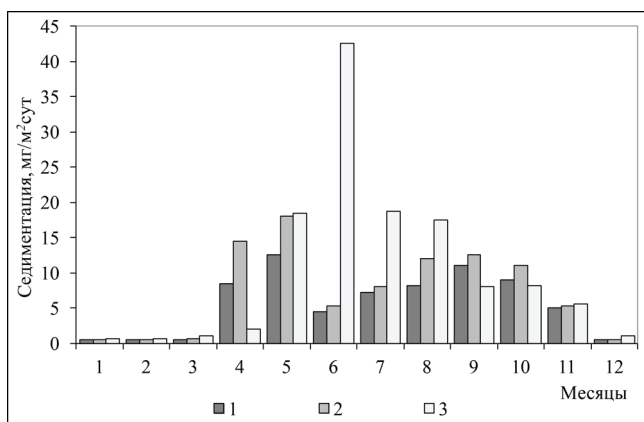


Рис. 2. Интенсивность седиментации общего фосфора в Истринском (1), Можайском (2) и Иваньковском (3) водохранилищах в 1984 г.

Fig. 2. The intensity of total phosphorus sedimentation in the Istra (1), Mozhaik (2) and Ivankovo (3) reservoirs in 1984

Режим содержания фосфора в водохранилищах. Характер внутригодового изменения концентрации общего фосфора в водохранилищах очень близок. Максимальные концентрации фосфора наблюдаются в период поступления в водоемы вод весеннего половодья (в апреле на Можайском и Истринском, в мае на Иваньковском водохранилищах), а минимальные – после окончания половодья и в зимние месяцы. Причем в Иваньковском водохранилище зимнее снижение концентрации фосфора менее ярко выражено, по-видимому, в результате загрязнения зимнего стока рек промышленными сбросами. Минимум приходится на ноябрь, а затем в течение зимы отмечается стабильный рост концентрации фосфора в водохранилище.

Высокий коэффициент водообмена Иваньковского водохранилища определил и невысокое значение коэффициента удержания фосфора, рассчитываемого по относительному снижению концентраций фосфора в водохранилище за год, в водоеме в 1984 г. Если в подмосковных водохранилищах, годовой коэффициент водообмена которых на порядок ниже, коэффициент удержания составил 62%, то в Иваньковском водохранилище всего 8%.

Таким образом, совместный анализ модельной имитации режима и баланса общего фосфора в Иваньковском водохранилище и слабопроточных Можайском и Истринском водохранилищах показал, что характер режима содержания фосфора, основные черты которого определяются гидрометеорологическими факторами, близок во всех водоемах. Географическая близость расположения водосборов водохранилищ определяет сходство режима притока с них фосфора. Тем не менее различия в размерах водосборов, их антропогенной освоенности, особенностях морфометрии и интенсивно-

сти водообмена существенно влияют на структуру баланса фосфора водоемов. Так, в результате большей хозяйственной освоенности водосбора, фосфорная нагрузка на Иваньковское водохранилище многократно превышает аналогичную нагрузку на подмосковные водохранилища. Следствием этого является также явное превышение интенсивности регенерации фосфора в Иваньковском водохранилище по сравнению с Можайским и Истринским водохранилищами и ее резкий рост после весеннего затопления больших площадей прибрежной полосы. Сезонный характер регулирования водохранилища и большая интенсивность его водообмена приводят к тому, что более 50% фосфора, вынесенного за пределы водохранилища, поступает в нижний бьеф и канал им. Москвы в течение апреля – июня, тогда как в подмосковных водохранилищах основной сброс фосфора идет в период межени. С высоким водообменом связано и то, что роль седиментационных процессов в расходной части баланса фосфора Иваньковского водохранилища в 2 раза меньше, чем в подмосковных водоемах, а коэффициент удержания фосфора в водоеме – в 7,5 раз.

Определенный интерес представляет рассмотрение структуры баланса общего фосфора Иваньковского водохранилища при более высоких величинах фосфорной нагрузки его водосбора. На основе гидрометеорологической информации 1984 г. были выполнены имитационные расчеты гидрологического режима водохранилища при повышении фосфорной нагрузки на водотоки водосбора до критических значений. В рассмотренном выше расчете концентрация фосфора в суммарном годовом притоке была равна 215 мг/м³, а среднегодовое значение концентрации фосфора в водоеме составило 182 мг/м³. То есть в результате внутриводоемных процессов происходит снижение содержания фосфора в водной массе в среднем на 15%. Водохранилище в отношении фосфора оказывает положительное влияние на экологическое состояние речных вод. Аналогично выполненным ранее для подмосковных водохранилищ модельным имитациям, нами проведены расчеты, в которых концентрация фосфора в суммарном годовом притоке воды с водосбора Иваньковского водохранилища была увеличена в 2 и 5 раз.

Из рис. 3 видно, что во всех водоемах с ростом фосфорной нагрузки средняя скорость седиментации фосфора также увеличивается. В то же время при одинаковой фосфорной нагрузке в подмосковных водоемах процессы седиментации протекают значительно быстрее, чем в Иваньковском водохранилище: в Можайском – в 1,6, в Истринском – в 1,4 раза. Связано это, в первую очередь, с различиями в интенсивности их водообмена, а во вторую – с особенностями морфологического строения этих водоемов.

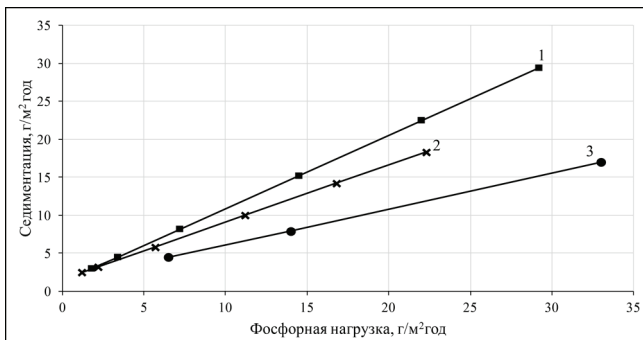


Рис. 3. Зависимость седиментации общего фосфора от величины фосфорной нагрузки на Можайском (1), Истринском (2) и Иваньковском (3) водохранилищах

Fig. 3. Dependence of total phosphorus sedimentation on the amount of phosphorus load in the Mozhaisk (1), Istra (2) and Ivankovo (3) reservoirs

С увеличением фосфорной нагрузки увеличивается и процент удержания фосфора во всех водоемах. Но в подмосковных водохранилищах он очень быстро достигает своего максимума, близкого к 95% (при нагрузке в 10–15 г/(м²·год)), а в Иваньковском водохранилище он растёт очень медленно и даже при очень больших нагрузках на водоем (130 г/(м²·год)) не превышает 75%.

С увеличением фосфорной нагрузки концентрация общего фосфора в сбросе из водохранилищ также растёт, но с разной интенсивностью. В Иваньковском водохранилище этот рост существенно выше, чем в подмосковных водохранилищах. Результаты сценарных расчетов при увеличении существующей фосфорной нагрузки на эти водоемы в 2 раза показывают, что Истринское водохранилище, характеризующееся самым слабым водообменом и сложным многолопастным строением своего ложа, наиболее интенсивно трансформирует сток фосфора в нижний бьеф гидроузла и эффективно осуществляет самоочищение проходящих через него речных водных масс. В Иваньковском водохранилище, водообмен которого на порядок выше, эффективность самоочищения воды при росте фосфорной нагрузки заметно ниже.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект № 20-17-00209).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бикбулатов Э.С. Биоэлементы и их трансформация в водных экосистемах. Рыбинск: Рыбинский печатный дом, 2009. 289 с.
- Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз). М.: Перо, 2015. 286 с.
- Даценко Ю.С. Влияние Иваньковского водохранилища на качество воды Волжского источника водоснабжения г. Москвы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. Геогр. 2021. № 5. с. 124–131.
- Иваньковское водохранилище. Современное состояние и проблемы охраны. М.: Наука, 2000. 344 с.
- Мениуткин В.В. Искусство моделирования (экология, физиология, эволюция). Петрозаводск. СПб., 2010. 416 с.
- Моделирование режима фосфора в долинном водохранилище / под ред. К.К. Эдельштейна. М.: Изд-во МГУ, 1995. 80 с.
- Страшкраба М., Гнаук А. Пресноводные экосистемы. Математическое моделирование. М.: Мир, 1989. 373 с.

По сценарным расчетам при увеличении притока фосфора с водосборов водохранилищ в 2 раза рост концентрации фосфора в них составит в Истринском водохранилище 15%, в Можайском – 23, в Иваньковском – 47%. При увеличении нагрузки в 5 раз этот рост составит, соответственно, 48, 72 и 159%.

ВЫВОДЫ

В водоеме сезонного регулирования (Иваньковское водохранилище) основное количество (более 50%) поступившего за год фосфора сбрасывается в нижний бьеф водохранилища в апреле – июне, а в водохранилищах многолетнего регулирования – во время летней и зимней межени.

Регенерация фосфора в Иваньковском водохранилище в 2 раза выше, чем в подмосковных водохранилищах, а интенсивность седиментации фосфора в нем на 50% больше, чем в Можайском водохранилище. Максимум седиментации приходится на июнь, а в подмосковных водохранилищах – на май. Вклад седиментационных процессов в формирование расходной части баланса фосфора Иваньковского водохранилища был в 2 раза меньше, чем в водохранилищах многолетнего регулирования.

При одинаковой фосфорной нагрузке на водоемы в подмосковных водохранилищах процессы седиментации протекают значительно быстрее, чем в Иваньковском водохранилище, что связано с различиями в интенсивности их водообмена и с особенностями морфологического строения ложа этих водоемов.

С увеличением фосфорной нагрузки процент удержания фосфора во всех водоемах увеличивается. В подмосковных водохранилищах он очень быстро достигает своего максимума, а в Иваньковском водохранилище растёт очень медленно и даже при высоких нагрузках на водоем не превышает 75%. Концентрация общего фосфора на выходе из водохранилищ также растёт, но с разной интенсивностью. Максимум эффекта самоочищения проявляется в Истринском водохранилище, минимум – в Иваньковском.

Эдельштейн К.К. Водохранилища России: экологические проблемы, пути их решения. М.: ГЕОС, 1998. 277 с.
Элементы круговорота фосфора в водоемах. Л.: Наука, 1987. 103 с.

Puklakov V. Mathematical Model of the Heat and Mass Transfer Processes in a Stratified Reservoir, *Int. Revuecs. Hydrobiol.*, 1995, vol. 80, no. 1, p. 49–59.

Поступила в редакцию 14.02.2022

После доработки 25.04.2022

Принята к публикации 27.06.2022

PHOSPHORUS BALANCE IN RESERVOIRS OF SEASONAL AND LONG-TERM REGULATION

Yu.S. Datsenko¹, V.V. Puklakov²

^{1,2} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Land Hydrology

¹ Professor, D.Sc. in Geography; e-mail: yuri0548@mail.ru

² Senior Scientific Researcher, Ph.D. in Geography; e-mail: puklakov@mail.ru

The results of model simulation of the phosphorus regime and balance in the Ivankovo, Mozhaik and Istra reservoirs, which carries out seasonal regulation of the Upper Volga runoff and long-term regulation of the Moskva and Istra rivers, are presented. The components of phosphorus balance were calculated using 2-D box model of heat and mass transfer which provides for day-by-day calculation of spatio-temporal distribution of water quality parameters. Phosphorus balance equation accounts for phosphorus input along the rivers and from the side watershed area, phosphorus regeneration from the bottom sediments, water release to the lower pool, and phosphorus removal through water discharge from the Ivankovo reservoir to the Moscow Canal, as well as the annual increase or decrease of phosphorus mass. Calculations refer to an average water year. A comparative analysis of phosphorus balance components in the Ivankovo reservoir and in the reservoirs near Moscow shows that the processes of sedimentation and regeneration of phosphorus from sediments are more intensive in the Ivankovo reservoir. The main discharge of phosphorus to the lower pool is during the spring flood period in the reservoir of seasonal regulation and during the low-water period in the reservoirs of long-term regulation. Scenario calculations provided graphs of the values of phosphorus retention in a reservoir depending on the increasing external phosphorus load.

Keywords: reservoir, hydroecological modeling, phosphorus load, sedimentation and phosphorus regeneration

Acknowledgements. The study was financially supported by the Russian Science Foundation (project 20-17-00209).

REFERENCES

- Bikbulatov E.S. *Bioelementy i ih transformatsiya v vodnyh ecosistemah* [Bioelements and their transformation in aquatic ecosystems], Rybinsk, Rybinsk Printing House, 2009, 289 p. (In Russian)
- Datsenko Y.S. Vliyanie Ivan'kovskogo vodohranilisha na kachestvo vody volzhskogo istochnika vodosnabzheniya g. Moskvy [The influence of the Ivankovo reservoir on water quality in the Volga River source of water supply for Moscow], *Vestn. Mosk. un-ta, Ser. 5, Geogr.*, 2021, no. 5, p. 124–131. (In Russian)
- Edelstein K.K. *Vodohranilisha Rossii: ekologicheskie problemy, puti ih resheniya* [Reservoirs of Russia: environmental problems, ways to solve them], Moscow, GEOS Publ., 1998, 277 p. (In Russian)
- Elementy krugovorota fosfora v vodoyomah* [Elements of the phosphorus cycle in water bodies], Leningrad, Nauka Publ., 1987, 103p. (In Russian)
- Gidroecologicheskiy rezhim vodohranilish Podmoskov'ya (nablyudeniya, diagnos, prognos)* [Hydroecological regime of reservoirs of the Moscow region (observations, diagnosis, forecast)], Moscow, Pero Publ., 2015, 286 p. (In Russian)
- Ivankovskoe vodohranilische. Sovremennoe sostoyanie i problemy ohrany* [Ivankovo reservoir. Current state and problems of protection], Moscow, Nauka Publ., 2000, 344 p. (In Russian)
- Menshutkin V.V. *Iskusstvo modelirovaniya (Ekologiya, fiziologiya, evolyutsiya)* [The art of modeling (ecology, physiology, evolution)], Petrozavodsk, SPb., 2010, 416 p. (In Russian)
- Modelirovanie rezhima fosfora v dolinnom vodohranilische* [Modeling of phosphorus regime in a valley reservoir], K.K. Edelstein (ed.), Moscow, MGU Publ., 1995, 80 p. (In Russian)
- Puklakov V. Mathematical Model of the Heat and Mass Transfer Processes in a Stratified Reservoir, *Int. Revuecs. Hydrobiol.*, 1995, vol. 80, no. 1, p. 49–59.
- Strashkraba M., Gnauk A. *Presnovodnye ekosistemy. Matematicheskoe modelirovanie*. [Freshwater ecosystems. Mathematical modeling], Moscow, Mir, 1989, 373 p. (In Russian)

Received 14.02.2022

Revised 25.04.2022

Accepted 27.06.2022