

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 310—317.  
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):310—317.

## ***ЭКОЛОГИЯ***

---

Научная статья  
УДК 556.555.7(282.247.412)  
doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-310-317

### **Многолетние изменения балансов химических веществ в Можайском водохранилище**

***Юрий Сергеевич Даценко, Валерий Владимирович Пуклаков***

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, ФГБОУ, г. Москва,  
Россия, yuri0548@mail.ru

*Аннотация.* На примере Можайского водохранилища анализируются многолетние изменения балансов биогенных веществ и органических веществ. Ряды длительностью 62 года (с момента создания водохранилища) созданы расчетами по имитационной гидроэкологической модели. Установлено снижение удерживающей способности водохранилища по фосфатам, органическому веществу, железу и марганцу, обусловленное изменением внутриводоемных составляющих баланса в результате увеличения объемов зон аноксии в гипolimнионе водохранилища.

*Ключевые слова.* Можайское водохранилище, балансы биогенных веществ, удерживающая способность водохранилища, зоны аноксии, трофность.

*Для цитирования:* Даценко Ю. С., Пуклаков В. В. Многолетние изменения балансов химических веществ в Можайском водохранилище // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 310—317. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-310-317.

## ***ECOLOGY***

---

Original article

### **Long-term changes of chemical balances in the Mozhask reservoir**

***Yuri S. Datsenko, Valery V. Puklakov***

Lomonosov Moscow State University, FGBOU, Moscow, Russia, yuri0548@mail.ru

*Summary.* The long-term changes in the balances and retention capacity of biogenic and organic substances in a typical Mozhask valley reservoir, which carries out deep flow regulation and stratified in summer, the series of balance components of chemicals for the entire 62-year period of operation of the reservoir are analyzed by mathematical modeling using a simulated hydroecological model that allows calculating spatial and temporal changes of environmental characteristics with a daily step. The trends of decreasing the retention capacity of the reservoir in phosphates, iron, manganese, organic matter and its increase in nitrates have been established. The decrease in the retention capacity of the reservoir is due to changes in the oxygen regime of the hypolimnion of the reservoir. An increase in the volume of anoxia zones leads to an increase in the intensity of nutrient flows at the water-bottom sediment boundary. Due

---

© Даценко Ю. С., Пуклаков В. В., 2024

to these increases, the intra-reservoir component of the incoming part of the balance of substances in the reservoir increases and, accordingly, the difference between the intake and discharge of substances from the reservoir decreases, which manifests itself in a decrease in the retention capacity of the reservoir. According to long-term data, the relationship between the retention capacity of the reservoir for phosphate and iron with the volumes of anoxia zones in the reservoir has been established. The increase in nitrate consumption is due to a gradual increase in the primary productivity of the reservoir and its eutrophication. Model calculations have also obtained long-term changes in the primary production of the reservoir. The revealed tendency to decrease the ratio of phytoplankton production and biomass in the reservoir indicates a decrease in energy efficiency per unit of biomass during the development of the reservoir ecosystem.

*Keywords.* Mozhaisk reservoir, nutrient balances, reservoir retention capacity, anoxia zones, trophicity.

*For citation:* Datsenko Y. S., Puklakov V. V. Long-term changes of chemical balances in the Mozhaisk reservoir. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):310—317. (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-310-317.

## Введение

Оценка состояния и многолетних тенденций изменения экосистем водохранилищ представляет собой самостоятельное исследование вследствие исключительной сложности и многофакторности процессов, определяющих изменения в круговороте вещества и энергии с течением времени. Причины этих изменений связаны с нестационарностью гидрологического режима и внешнего воздействия в виде непредсказуемо меняющейся синоптической обстановки. При создании водохранилищ происходит трансформация химического стока рек под влиянием комплекса внутриводоемных физических, химических и биологических процессов. Определенное представление о характере этой трансформации и, следовательно, о степени влияния водохранилища на химический сток может быть получено анализом многолетних балансов химических веществ, суммарно учитывающих их поступление и сброс из водоема. Эти балансы могут существенно различаться в зависимости от особенностей внутриводоемных процессов под влиянием гидрометеорологических факторов и режима регулирования стока в разные годы. При этом интегральную характеристику влияния водохранилища на химический сток в системе «ландшафт водосбора реки — водные массы водохранилища — донные отложения» можно получить расчетами разницы поступления вещества и его расходования, отнесенной к величине поступления, называемой удерживающей способностью водохранилища ( $R$ , %). Однако анализ многолетних изменений удерживающей способности водоемов чрезвычайно затруднен из-за отсутствия надежной информации о составляющих баланса химических веществ на протяжении длительных периодов эксплуатации водохранилища. Альтернативным методом решения этой задачи может служить гидроэкологическое моделирование, с помощью которого можно рассчитать многолетние балансы химических веществ и тем самым учесть многообразие влияния внутриводоемных процессов на экосистему водохранилища в различные по гидрометеорологическим условиям годы.

Цель работы состоит в анализе многолетних изменений балансов органического вещества, минеральных форм азота и фосфора, железа и марганца в Можайском водохранилище — типичном долинном водохранилище многолетнего регулирования стока.

## Материал и методика

Осуществляющее многолетнее регулирование стока с целью увеличения водных ресурсов московского источника водоснабжения г. Москвы Можайское водохранилище — типичный относительно глубокий морфологически простой водоем долинного типа (объем при НПУ — 0,24 км<sup>3</sup>, площадь — 31 км<sup>2</sup>, максимальная глубина — 22 м), имеющий вытянутую в плане акваторию и замедленный водообмен (коэффициент водообмена — 1,15 1/год)

Для расчета балансов использовалась двумерная боксовая гидроэкологическая модель водохранилищ ГМВ-МГУ. Модель с суточным шагом воспроизводит физико-химико-биологические характеристики водных масс в отдельных участках водохранилища с учетом особенностей ложа и проточности в зависимости от ежедневно меняющихся погодных условий, притока воды с водосбора и ее сброса в нижний бьеф гидроузла. Подробное описание модели и оценки ошибок расчетов путем валидации результатов по гидролого-гидрохимическим съемкам водохранилища изложены в монографии [1]. Приходная часть химических балансов представляет собой приток веществ с речными водами, который рассчитывался по данным мониторинга качества воды водохранилища для разных фаз гидрологического режима по эмпирическим зависимостям концентраций химических веществ от расходов воды притоков. Расход веществ из водохранилища определялся по данным о сбросах воды в нижний бьеф и концентраций в сбросе, рассчитанных по модели, как результат их трансформации в водохранилище под влиянием внутриводоемных процессов.

Модельными расчетами были сформированы многолетние ряды годовых внешних балансов показателей органического вещества (по перманганатной окисляемости), концентраций железа, марганца, аммонийного азота, нитратов и фосфатов за весь 62-летний период эксплуатации водохранилища (1961—2022 гг.).

## Результаты

Среднемноголетние значения удерживающей способности Можайского водохранилища по рассмотренным показателям химического состава воды характеризуются положительными величинами. Однако только для железа положительное значение внешнего баланса наблюдалось во все рассмотренные годы, для остальных показателей были годы, когда сброс из водохранилища превышал приток. Многолетние колебания удерживающей способности водохранилища для рассматриваемых характеристик представлены на рис. 1.

Прямая линия представляет линейный тренд, значимость которого (вклад в дисперсию функции отклика) можно оценить по коэффициенту детерминации. Критическое значение  $R^2$  на уровне значимости 0,05 определяется по формуле  $R^2_{кр} = 4/(n+2)$ . При  $n = 62$   $R^2_{кр} = 0,062$ . Из рис. 1 видно, что тренды являются значимыми за исключением тренда аммонийного азота.

Отчетливо выраженная тенденция снижения удерживающей способности водохранилища проявляется для железа, марганца, фосфатов и органического вещества. Влияние водохранилища на трансформацию аммонийного азота с течением

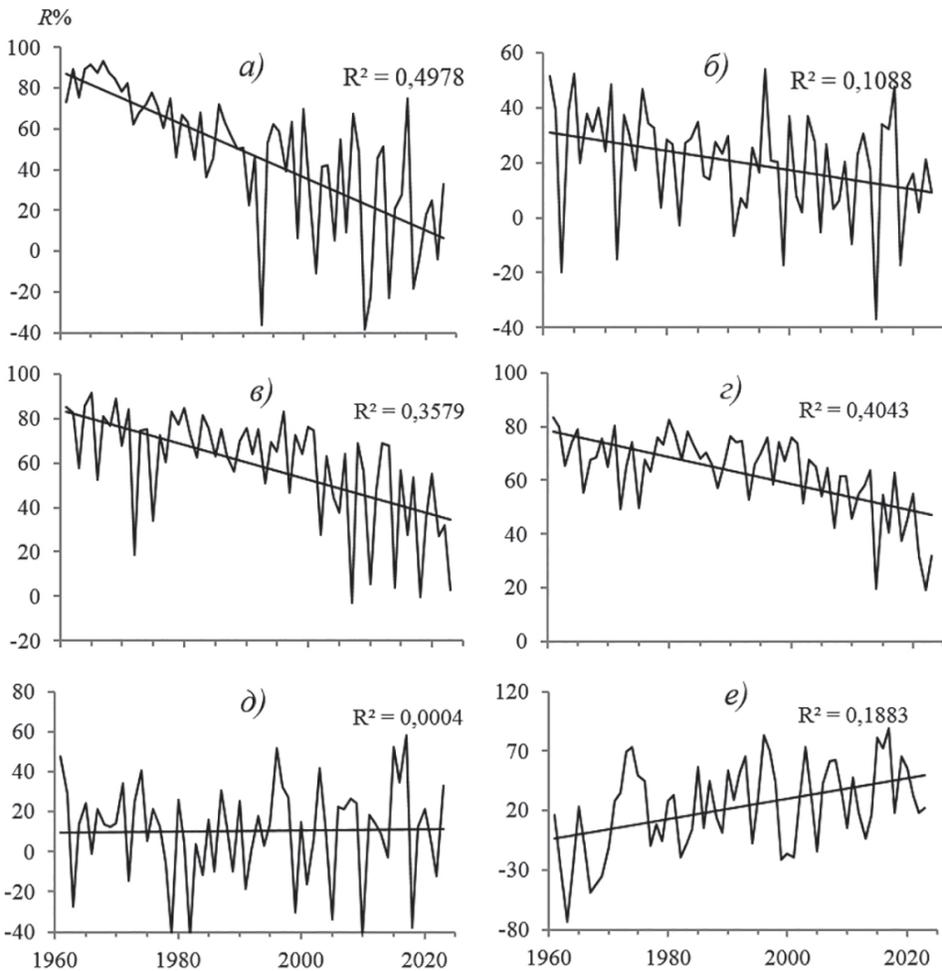


Рис. 1. Многолетние изменения удерживающей способности ( $R\%$ ) Можайского водохранилища по а) фосфатам, б) перманганатной окисляемости (ПО), в) железу, г) марганцу, д) аммонийному иону, е) нитратам.

Fig. 1. Long-term changes in the retention capacity ( $R\%$ ) of the Mozhaisk reservoir by а) phosphates, б) permanganate oxidizability, (PO), в) iron, г) manganese, д) ammonium ion, е) nitrates.

времени не изменяется, а для нитратов величина годового удержания постепенно увеличивается.

Высокие значения удерживающей способности водохранилища по железу и марганцу обусловлены образованием взвешенных форм этих элементов из растворенных закисных соединений с последующим осаждением в условиях замедления водообмена при доминировании окислительно-восстановительных

процессов, протекающих в водохранилище с участием микроорганизмов. Для балансов железа и марганца отмечено существование прямой зависимости удерживающей способности водохранилища от водности года, при этом в многоводные годы влияние водохранилища на сток этих веществ возрастает. Высокий коэффициент корреляции связи величин удерживающей способности железа и марганца подтверждает сходство механизмов трансформации этих элементов переменной валентности в водохранилище.

Отмеченные тенденции однозначно связаны с постепенными изменениями, происходящими с течением времени в экосистеме водохранилища, которые обусловлены главным образом энергетической основой круговорота вещества и энергии в водоеме — первичным продуцированием органического вещества. Ранее в Можайском водохранилище уже была отмечена многолетняя тенденция роста величины годовой первичной продукции [2]. Одним из важнейших следствий эвтрофирования является изменение режима растворенного кислорода и увеличения объемов и продолжительности существования зон аноксии в придонных слоях водохранилища [3]. Аноксия в придонных слоях оказывает большое влияние на процессы обмена на границе «вода — донные отложения», увеличивая интенсивность диффузионных потоков химических веществ из дна в водную толщу [4]. Потоки из донных отложений входят в приходную часть внутриводоемных составляющих баланса химических веществ. По-видимому, именно увеличение этой составляющей определяет снижение удерживающей способности водохранилища по веществам, в круговороте которых существенную роль играет внутренняя нагрузка. Это подтверждается существованием значимой зависимости удерживающей способности по фосфору и железу (рис. 2) и объемами зон аноксии (коэффициенты корреляции соответственно 0,72,  $\alpha = 0,05$  и 0,74,  $\alpha = 0,05$ ).

Тенденция уменьшения удерживающей способности по органическому веществу связана с увеличением общего содержания органического вещества

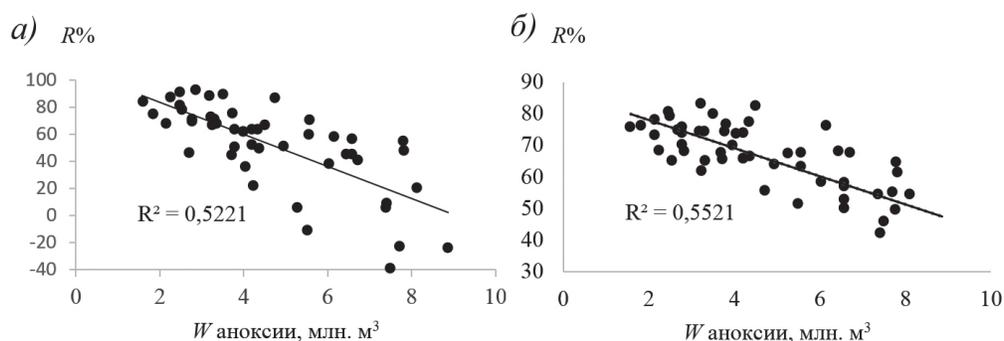


Рис. 2. Зависимость удерживающей способности водохранилища от объемов зон аноксии в гипolimнии водохранилища по фосфатам (а) и железу (б).

Fig. 2. Dependence of the retention capacity of the reservoir on the volume of anoxia zones in the hypolimnion of the reservoir for phosphates (a) and iron (b).

в водохранилище в результате роста первичной продуктивности экосистемы водохранилища, что, видимо, проявилось даже для показателя стойкого органического вещества — перманганатной окисляемости.

Многолетние тенденции удерживающей способности минеральных азотных соединений имеют несколько иной характер. Удерживающая способность водохранилища по нитратам с течением времени увеличивается, а для аммонийного азота не изменяется. Это, вероятно, обусловлено возрастанием интенсивности потребления минерального азота в продукционных процессах при эвтрофировании водохранилища. Донные отложения во внутриводоемном круговороте азотных соединений имеют значительно меньшее значение, чем для фосфатов и железа. Для аммонийного азота возрастающее потребление при увеличении биомассы фитопланктона частично компенсируется потоками из дна, а для нитратов, практически не имеющих этого внутриводоемного источника, это не происходит, поэтому внешний баланс увеличивается.

Наконец, еще один аспект многолетних изменений показателей экологического состояния водоема заслуживает внимания в связи с эволюцией его экосистемы. В процессе эвтрофирования происходит снижение интенсивности фотосинтеза на единицу хлорофилла или снижение его ассимиляционной активности. В ходе развития экосистемы (сукцессии) уменьшается отношение продукция/биомасса (П/Б коэффициент). Это соответствует тому, что экосистема стремится к состоянию, когда на единицу доступной энергии приходится максимум биомассы [5]. Рассчитанные нами многолетние изменения соотношения П/Б в Можайском водохранилище (рис. 3) показали, хотя и слабую, но достаточно отчетливо выраженную тенденцию уменьшения этого соотношения, иллюстрирующую существующие теоретические представления о развитии экосистемы водохранилища.

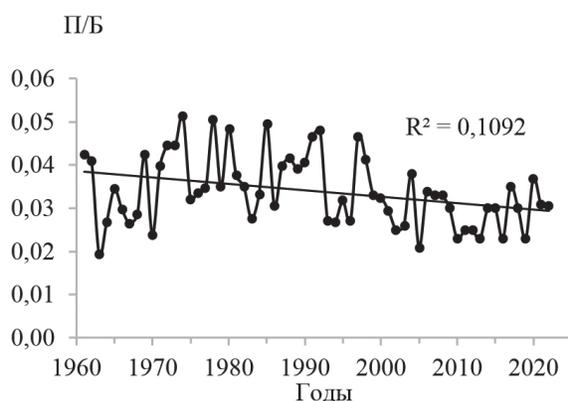


Рис. 3 Многолетние изменения П/Б коэффициента фитопланктона Можайского водохранилища.

Fig. 3 Long-term changes in the P/B coefficient of phytoplankton in the Mozhaik reservoir.

### Заключение

Анализом многолетних рядов внешних балансов биогенных и органических веществ в Можайском водохранилище установлены тенденции понижения удерживающей способности по органическому веществу, фосфатам, железу и марганцу и повышения по нитратам. Появление этих тенденций обусловлено изменениями в экосистеме водохранилища, связанными с ростом его первичной продуктивности. Эвтрофирование Можайского водохранилища привело к изменениям внутриводоемных составляющих баланса биогенных веществ, в частности увеличения потоков на границе «вода – донные отложения», что проявилось в снижении удерживающей способности водохранилища по рассмотренным веществам. Закономерности развития экосистемы водохранилища сопровождаются снижением количества энергии, расходуемой на единицу биомассы фитопланктона, что подтверждается установленной для водохранилища тенденцией уменьшения отношения продукции к биомассе за период его эксплуатации.

### Список литературы

1. Гидроэкологический режим водохранилищ Подмосковья (наблюдения, диагноз, прогноз) / под ред. К. К. Эдельштейна. М.: Перо, 2015. 286 с.
2. Эдельштейн К. К., Даценко Ю. С., Пуклаков В. В. Цветение водохранилища многолетнего регулирования стока // Водные ресурсы, 2021. №2. С.164—172. DOI: 10.31857/S0321059621020048.
3. Даценко Ю. С., Пуклаков В.В. Анализ многолетних изменений зон аноксии в Можайском водохранилище по результатам модельных расчетов // Водные ресурсы, 2021. №1. С.34—41. DOI: 10.31857/S0321059621010132.
4. Даценко Ю. С. Методы оценки внутренней биогенной нагрузки водоемов (обзор) // Труды Карельского научного центра РАН. Серия: Лимнология и океанология. 2019. №9. С.116—124. DOI: 10.17076/lim1049.
5. Минеева Н. М. Первичная продукция планктона в водохранилищах Волги. Ярославль: Принтхаус, 2009. 278 с.

### References

1. Hydroecologycheskii rejim vodohranilisch Podmoskovyya (nablyudeniya, diagnoz, prognoz). Hydroecological regime of reservoirs of Moscow region. Moscow. Pero. 2015: 286. [In Russian].
2. Edelshtein R. R., Datsenko Y. S., Puklakov V. V. Blooming reservoirs of long-term flow regulation. *Vodnye resursy = Water resources*. 2021; (2): (164—172). [In Russian]. DOI: 10.31857/S0321059621020048.
3. Datsenko Y. S., Puklakov V. V. Analysis of long-term changes in anoxia zones in the Mozhaik reservoir based on the results of model calculations. *Vodnye resursy = Water resources*. 2021; (1): (34—41). [In Russian]. DOI: 10.31857/S0321059621010132.
4. Datsenko Y. S. Methods for assessing the internal biogenic load of reservoirs (review). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN. Seriya Limnologiya i okeanologiya = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Series: Limnology and Oceanology*. 2019; (9): (116—124). [In Russian]. DOI: 10.17076/lim1049.
5. Mineeva N. M. The primary production of plankton in the reservoirs of the Volga. *Yaroslavl. Prinhaus*. 2009: 79 p. [In Russian].

### Сведения об авторах

Юрий Сергеевич Даценко, доктор географических наук, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, профессор кафедры гидрологии суши географического факультета, yuri0548@mail.ru.

*Валерий Владимирович Пуклаков*, кандидат географических наук, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, старший научный сотрудник кафедры гидрологии суши географического факультета.

***Information about authors***

*Yuri Sergeevich Datsenko*, Doctor of Geographical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Professor of the Department of Hydrology, Faculty of Geography, yuri0548@mail.ru.

*Valery Vladimirovich Puklakov*, Candidate of Geographical Sciences, Lomonosov Moscow State University, Senior Researcher at the Department of Hydrology, Faculty of Geography.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 01.02.2024*

*Принята к печати после доработки 29.04.2024*

*The article was received on 01.02.2024*

*The article was accepted after revision on 29.04.2024*