

Гидрология и гидрохимия

УДК 556.55:550.4

О РАСЧЕТЕ РЕЖИМА ФОСФОРА ПРИ НАЧАЛЬНОМ ЗАПОЛНЕНИИ ВОДОХРАНИЛИЩА

Ю. С. Даценко

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, e-mail: yuri0548@mail.ru

Поступила в редакцию 28.12.2021

Представлены результаты расчетов изменений концентрации фосфора в водохранилище в период становления его экосистемы после начального заполнения речными водами. Расчеты основаны на балансовой модели фосфора в водоеме идеального перемешивания с использованием средних значений параметров, приводимых в литературе. Использована модификация баланса фосфора в виде, представленном Диллоном и Риглером. Выщелачивание фосфора из затопленных почв аппроксимируется экспоненциальной зависимостью. Представлен типовой ход изменения концентрации фосфора в водохранилище под влиянием затопленных почв. Установлены зависимости времени наступления максимума концентрации фосфора в водохранилище от интенсивности процесса выщелачивания и параметра балансового уравнения, учитывающего соотношение коэффициента водообмена и коэффициента фосфорного удержания. Показано, что время наступления максимума концентраций фосфора после затопления резко снижается с ростом интенсивности водообмена при небольших его значениях, но в дальнейшем роль этого фактора становится малозначимой.

Ключевые слова: водохранилища, режим фосфора, поток фосфора из донных отложений, коэффициент водообмена.

DOI: 10.47021/0320-3557-2022-7-12

ВВЕДЕНИЕ

Одна из наиболее значительных особенностей процессов формирования качества воды водохранилищ по сравнению с озерами связана с наличием периода становления экосистемы в первые годы после заполнения ложа водохранилища. В этот период затопленные почвы и растительность представляют собой значимый внутренний источник биогенных элементов, поддерживающих высокий уровень продуктивности экосистемы. Резкая смена реофильных на лимнофильные виды водных организмов приводит к перестройке экосистемы, которая с течением времени стремится к равновесному устойчивому состоянию. В различных географических условиях и при разных режимах заполнения чаши водохранилища этот период может длиться от одного до десятка лет. Длительность периода стабилизации экосистемы определяется, главным образом, интенсивностью процесса выщелачивания биогенных веществ из затопленного ложа.

Для периода становления экосистемы водохранилища в первые годы его существования характерно образование и широкое распространение анаэробных зон в придонных слоях водоема даже при сравнительно слабой стратификации. Исследования показывают, что в этот период наблюдается особо высокая активность бактериальной микрофлоры. [Kimmel et al., 1988]. Интенсивное разложение как затопленной, так и продуцированной фи-

топланктоном органики быстро приводит к истощению запасов кислорода во всей толще, что приводит к заморам рыб и увеличению скорости выщелачивания химических соединений из затопленных почв. Интенсивность процессов выноса биогенов из затопленных почв в аэробных и анаэробных условиях существенно различается [Shui-Ping, 1997]. В анаэробных условиях выщелачивание происходит значительно интенсивнее и вспышки развития фитопланктона происходят чаще.

В районах тропической и субтропической зоны вследствие высоких температур воды анаэробные условия в затопленной чаше водохранилища наблюдаются постоянно, но период стабилизации более короткий, чем в водоемах умеренной зоны. Для различных компонентов экосистемы длительность периода стабилизации может существенно различаться. Первыми реагируют на изменение внешних условий организмы фитопланктона в силу быстрого оборота их биомассы. Организмы более высоких порядков (от “мирного” зоопланктона до хищных рыб) откликаются на изменения первичной продукции с задержкой во времени, продолжительность которой определяется их положением в трофической цепи. Детальные наблюдения за последствиями подъема уровня в олиготрофном оз. Саппоро (Япония) показали, что наблюдавшаяся перестройка фитопланктонного сообщества длилась один год, в то время как ста-

новление состава зоопланктона потребовало два года [Teru Ioriya, 1998].

Важное значение для периода становления экосистемы имеет и длительность процесса заполнения водохранилища. Если этот период затягивается на годы, то новые и новые затопляемые площади последовательно становятся источниками биогенных и органических веществ и в этом случае процесс влияния затопленных почв значительно растягивается.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Экспериментальные исследования рассматриваемого процесса показывают, что интенсивность выщелачивания максимальна в первые годы, затем постепенно убывает. Теоретически это убывание может быть представлено экспонентой (например, для фосфора) $P_t = B \cdot e^{-\alpha t}$, где B, P_t – начальная интенсивность потока фосфора из затопленных почв и растительности (т/год) и поток P в момент времени t , α – коэффициент снижения интенсивности потока из почв.

Этот процесс можно учесть в классическом уравнении баланса фосфора в водоеме полного мгновенного перемешивания:

$$\frac{dP}{dt} = L + B \cdot e^{-\alpha t} - (K_s + K_v) \cdot P \quad (1)$$

P – общее содержание фосфора в водоеме, т

L – внешняя нагрузка на водоем, в т/год

K_v – коэффициент водообмена, 1/год

K_s – коэффициент седиментации фосфора, 1/год

Обозначим $(K_s + K_v) = \varphi$ и, используя модификацию балансового уравнения, предложенную Диллоном Р. и Риглером Ф. [Dillon, Rigler, 1975], согласно которой

$$\left(K_s = \frac{K_v \cdot R}{1 - R}\right), \text{ где } R - \text{ коэффициент}$$

удержания фосфора в водохранилище, получаем

$$\varphi = \frac{K_v}{1 - R}$$

Решение балансового уравнения (1) в этом случае имеет вид [Ostrofsky, Duthie, 1978]

$$P_t = \frac{L}{\varphi} (1 - e^{-\varphi t}) + \frac{B}{\varphi - \alpha} (e^{-\alpha t} - e^{-\varphi t}) + P_0 \cdot e^{-\varphi t}$$

Количественно оценить некоторые параметры процесса стабилизации экосистемы водохранилища после заполнения ложа в зависимости от характера регулирования водохранилищем речного стока можно путем расчетов по простым балансовым моделям биогенных веществ в водохранилище. В настоящей работе балансовая модель фосфора применена для оценки длительности процесса стабилизации экосистемы водохранилища в период его заполнения.

P_0 – начальное содержание фосфора в водохранилище, т.

Значения параметра φ для крупных водохранилищ России колеблются в значительных пределах. Так для водохранилищ ЕЧ России пределы колебаний коэффициента водообмена составляют от 1.0 (Цимлянское водохранилище) до 19.0 1/год (Саратовское водохранилище), а величина коэффициента удержания фосфатов от 0.05 до 0.6 [Даценко, 2007, (Datsenko, 2007)]. Соответственно параметр φ колеблется в пределах от 1.05 до 47.5. Существенно различается также величина внешней фосфорной нагрузки водохранилищ.

Коэффициенты выщелачивания могут быть получены путем лабораторных экспериментов. Примером таких исследований служат работы ряда лимнологов в Европе и Китае [Shui-Ping Chang, Ching-Gung Wen, 1996, Miner, 1974, Voers, 1988], в которых показано, что эти коэффициенты значительно варьируют в зависимости от типа почв, степени покрытости дна и характера затопленной растительности. В России при оценках влияния затопления на качество воды водохранилищ широко используются методики Института гидробиологии Украины [Майстренко, Денисова, 1972, (Maistrenko, Denisova, 1972)], которые позволяют рассчитывать поступление биогенных и органических веществ из затопленных растительности и почв, а также оценить влияния этих объектов на содержание кислорода в воде водохранилищ. Данные методики применялись при прогнозе качества воды Днепровских [Майстренко, Денисова, 1972 (Maistrenko, Denisova, 1972)], Виллойского [Лабутина, 1985, (Labutina, 1985)] и Бурейского [Мордовин и др., 2006, (Mordovin et al., 2006)] водохранилищ.

Сложнее всего определить параметр экспоненциального изменения скорости выщелачивания биогенных веществ. В наших расчетах мы воспользовались оценкой величины α , проведенной по результатам наблюдений за становлением гидрохимического режима в во-

дохранилище Смолвуд (США) в первые годы его существования, которая привела к значению 1.5 л/год [Ostrofsky, Duthie, 1978].

Для ориентировочных сценарных расчетов процесса становления гидрохимического режима рассматривался диапазон начальной интенсивности потока фосфора – 200–1000 мг/м², которая соответствует средним

значениям эмпирических коэффициентов, используемых для расчета органических и биогенных веществ, поступающих в воду водохранилищ из затопленной растительности и почв в упомянутой методике [Майстренко, Денисова, 1972, (Maistrenko U.G., Denisova A.I., 1972)].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Если выразить параметры потоков фосфора из затопленных почв в единицах мг/м² год, а начальную концентрацию в мг/м³ (содержание фосфора в столбе воды над 1 кв. м площади дна), то подставляя приведенные выше значения параметров φ , α , B , среднее значение φ для

водохранилищ России, и принимая начальную концентрацию 500 мг/м³ получаем следующий вид изменений концентраций фосфора с течением времени при становлении экосистемы водохранилища (рис. 1).

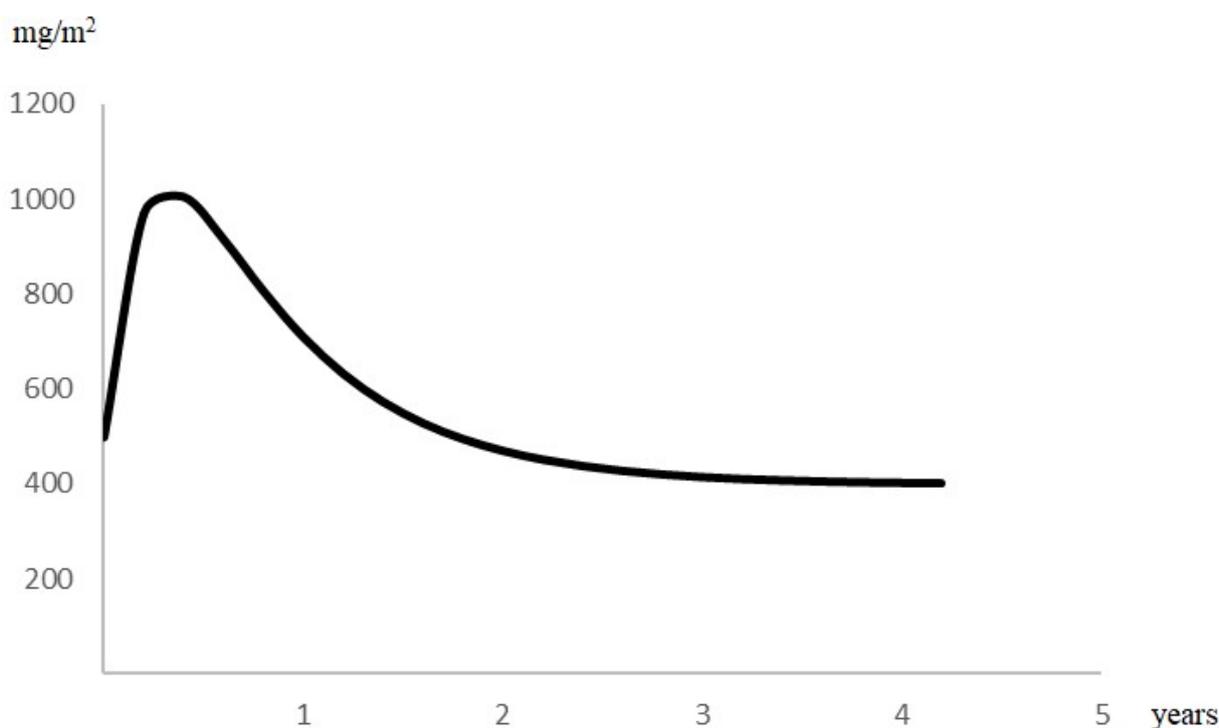


Рис. 1. Изменение концентраций фосфора в первые годы существования водохранилища.

Fig. 1. Changes in phosphorus concentrations in the first years of the reservoir's existence.

Дифференцированием уравнения (1) можно определить время достижения максимума концентрации биогенных веществ при выщелачивании

$$t = \frac{1}{\varphi - \alpha} \ln \left[\frac{(L - \varphi \cdot P_0)(\varphi - \alpha) + \varphi \cdot B}{B \cdot \alpha} \right] \quad (2)$$

В становлении экосистемы водохранилища выделяется максимум в изменении концентрации биогенного элемента, после которого наступает медленный спад влияния потоков из затопленных почв. Зависимости времени

наступления максимума существенно различаются под влиянием различных факторов. Это время можно рассчитать по приведенному уравнению (2) в зависимости от рассматриваемых параметров, из которых к числу определяющих следует отнести интенсивность выщелачивания фосфора и сумму коэффициента водообмена водохранилища и коэффициента седиментации фосфора. Для принятых нами значений параметров такие зависимости времени наступления максимума от главных факторов процесса выщелачивания имеют вид, представленный на рис. 2.

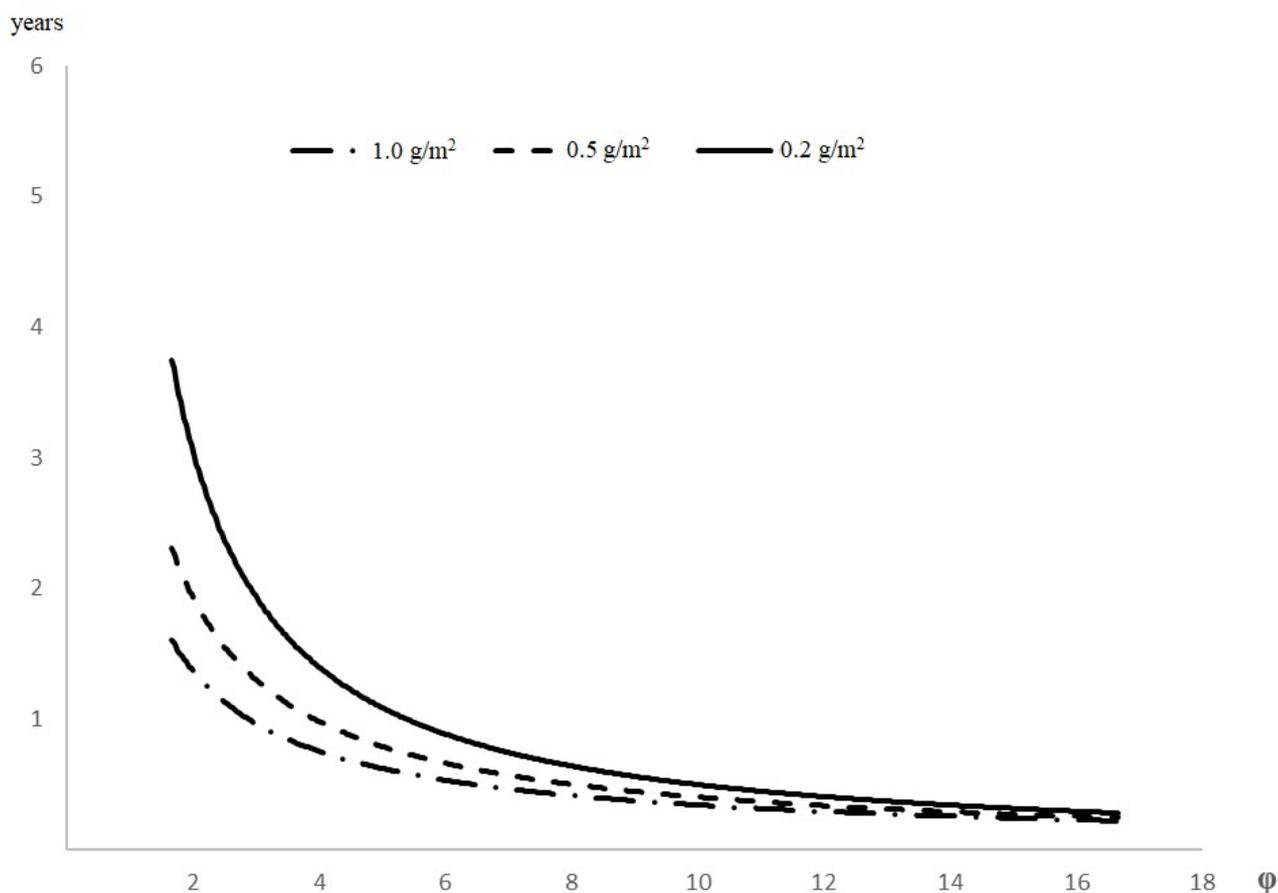


Рис. 2. Изменение времени наступления максимума концентраций фосфора в водохранилище в зависимости от параметра φ (цифры у кривых значение начальной интенсивности потока фосфатов из почв).

Fig 2. The change in the time of occurrence of the maximum phosphorus concentrations in the reservoir, depending on the intensity of the phosphorus flow of the parameter φ (the figures in the curves the initial intensity of the phosphate outflow from the soil).

Расчеты показывают, что время наступления максимума резко снижается с ростом интенсивности водообмена. При коэффициенте φ равном 4.0 это время уменьшается до одного года, а при высоких значениях интенсивности водообмена в высокопроточных водохранилищах это время стремится к нулю, т.е.

влияние затопленных почв практически не проявляется. Начальная интенсивность потока фосфатов из почв имеет существенное значение только при низких значениях коэффициента водообмена и коэффициента седиментации. В дальнейшем роль этого фактора становится малозначимой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ решения балансового уравнения показывает, что степень влияния затопленных почв на формирование запаса биогенных веществ в водохранилищах зависит от

- соотношения внутренней и внешней химической нагрузки и растет с ростом последней,

- чем выше коэффициент водообмена водохранилища, тем слабее проявляется влияние затопленных почв на экосистему водоема.

Таким образом, при наличии экспериментальных оценок параметров, характеризующих скорости процесса выщелачивания биогенных веществ в затопленном ложе проектирующегося водохранилища, можно получить номограммы для оценки ожидаемых изменений гидрохимического режима водохранилища под влиянием вторичного источника химических веществ в виде потока из затопленных почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Даценко Ю.С. Эвтрофирование водохранилищ. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.

Денисова А.И. Формирование гидрохимического режима Днепра и методы его прогнозирования. Киев: Наукова думка, 1979. 292 с.

- Майстренко Ю.Г., Денисова А.И. К методике прогнозирования органических и биогенных веществ в существующих и прогнозируемых водоемах // *Гидрохимические материалы*, 1972. Т. 53. С. 86–115.
- Мордовин А.М., Петров Е.С., Шестеркин В.П. Гидроклиматология и гидрохимия Зейского водохранилища. Хабаровск. Дальнаука, 1997. 137 с.
- Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Гидрохимия Бурейского водохранилища в период заполнения (2005–2006 гг.) // *Современные проблемы водохранилищ и их водосборов*. Т. II. Пермь: ПГУ. 2007. С. 100–104.
- Boers P.C.M., Yese O.V. Phosphorus release from the peaty sediments of the Loosdrecht Lakes (The Netherland). // *Wat. Res.* 1988. Vol. 22(3). P. 355–363.
- Dillon P.J., Rigler F.H. A simple method for predicting the capacity of a lake for development based on lake trophic status // *J. Fish. Res. Bd. Can.* 1975. Vol. 32. P. 1519–1531.
- Kimmel B.L., Soballe D.M., Adams S.M., Palumbo A.V., Ford C.J., Bevelhimer M.S. Inter-reservoir interactions: Effect of a new reservoir on organic matter production and processing in a multiple-impoundment series. // *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 1988. Vol. 23. P. 985–994.
- Miner N.H. The potencial for impact of inundation of terrestrial vegetation on the water quality of Quabbin reservoir of Massachusetts // *Wat. Res. Bull.* 1974. Vol. 10(6). P. 1288–1297.
- Ostrofsky M.L., Duthie H.C. An approach to modelling productivity in reservoirs // *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 1978. Vol. 20. P. 1562–1567.
- Teru Ioriya, Satoshi Inoue, Masaru Haga, Noriaki Yogo. Change of chemical and biological water environment at a newly-constructed reservoir // *Wat.Sci.Tech.* 1998. Vol. 37. № 2. P. 187–194.

REFERENCES

- Boers P.C.M., Yese O.V. Phosphorus release from the peaty sediments of the Loosdrecht Lakes (The Netherland). *Wat. Res.*, 1988, vol. 22(3), pp. 355–363.
- Datsenko Y.S. Evtrofirovaniye vodohranilisch. [Eutrophication of reservoirs]. M., GEOS, 2007. 252 p. (In Russian)
- Denisova A.I. Formirovaniye gidrohimicheskogo rejima Dnepra I metody ego prognozirovaniya. [Formation of the hydrochemical regime of the Dnieper and methods of its forecasting]. Kyev, Naukova dumka. 1979. 292 p. (In Russian)
- Dillon P.J., Rigler F.H. A simple method for predicting the capacity of a lake for development based on lake trophic status. *J. Fish. Res. Bd. Can.*, 1975, vol. 32, pp. 1519–1531.
- Kimmel B.L., Soballe D.M., Adams S.M., Palumbo A.V., Ford C.J., Bevelhimer M.S. Inter-reservoir interactions: Effect of a new reservoir on organic matter production and processing in a multiple-impoundment series. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 1988, vol. 23, pp. 985–994.
- Maistrenko U.G., Denisova A.I. K metodike prognozirovaniya organicheskikh I biogennykh veschevstv v suschesvuyuschih i proektiruemykh vodoiomah [On the methodology of forecasting organic and biogenic substances in existing and projected reservoirs]. *Gidrohimicheskie materialy*, 1972, bd. 53, pp. 86–115. (In Russian)
- Miner N.H. The potencial for impact of inundation of terrestrial vegetation on the water quality of Quabbin reservoir of Massachusetts. *Wat. Res. Bull.*, 1974, vol. 10(6), pp. 1288–1297.
- Mordovin A.M., Petrov E.S. Shestiorkin V.P. Gidroklimatologiya I gidrohiimiya Zeiskogo vodohranilisha. [Hydroclimatology and hydrochemistry of the Zeya reservoir]. Habarovsk, Dalnauka, 1997, 137 p. (In Russian)
- Ostrofsky M.L., Duthie H.C. An approach to modelling productivity in reservoirs. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 1978, vol. 20, pp. 1562–1567.
- Shestiorkin V.P., Shestiorkina N.M. Gidrohiimiya Bureiskogo vodohranilisha v period ego zapolneniya (2005-2006g.). [Hydrochemistry of the Bureysky reservoir during the filling period (2005-2006)]. *Sovremennye problem vodohranilisch i ih vodosborov*. Т. II. Perm, PGU. 2007, pp. 100–104. (In Russian)
- Teru Ioriya, Satoshi Inoue, Masaru Haga, Noriaki Yogo. Change of chemical and biological water environment at a newly-constructed reservoir. *Wat.Sci.Tech.*, 1998, vol. 37, no. 2, pp. 187–194

ON THE CALCULATION OF THE PHOSPHORUS REGIME AT THE INITIAL FILLING OF THE RESERVOIR

Y. S. Datsenko

Moscow Lomonosov State University,
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1., e-mail: yuri0548@mail.ru

Revised 28.12.2021

The results of the calculations in changes of the phosphorus concentration in the reservoir during the formation of its ecosystem after the initial filling by river waters are presented. During this period, flooded soils and vegetation represent a significant internal source of nutrients that maintain a high level of ecosystem productivity. Calculations are based on the balance model of phosphorus in a completely mixed water body using the average values of the parameters given in the literature. A modification of the phosphorus balance as presented by Dillon and Rigler was used. Phosphorus leaching from flooded soils is approximated by an exponential relationship. Graphically illustrated is a typical course of change in the phosphorus concentration in the reservoir under the influence of flooded soils, which is a relatively rapid increase in concentrations followed by a gradual decrease. The most important parameter of this process is the time of the onset of the maximum concentration. By calculations have obtained dependences of the time of onset of the maximum phosphorus concentration in the reservoir on the intensity of the leaching process

and the parameter of the balance equation. This parameter is the ratio of the water exchange coefficient and the phosphorus retention coefficient. It is shown that the time for the onset of the maximum phosphorus concentrations after flooding decreases sharply with an increase in the intensity of water exchange at its small values, but later the role of this factor becomes insignificant.

Keywords: reservoir, phosphorus regime, phosphorus flow from flooded soils, water exchange coefficient