

ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ НАУКИ

РАЦИОНАЛИЗАЦИЯ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 504

DOI: 10.18384/2712-7621-2021-2-6-14

ДОПУСТИМЫЕ ФОСФОРНЫЕ НАГРУЗКИ НА ВОДОХРАНИЛИЩА РОССИИ

Фрумин Г. Т.¹, Горелышев А. Ю.², Кулинкович А. В.²

¹ *Российский государственный педагогический университет имени А. И. Герцена
191186, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, д. 48, Российская Федерация*

² *Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
имени проф. М. А. Бонч-Бруевича
193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, Российская Федерация*

Аннотация

Цель. Оценить допустимые фосфорные нагрузки на водохранилища России.

Процедура и методы. Для 21 водохранилища рассчитаны допустимые фосфорные нагрузки, позволяющие им оставаться в олиготрофном статусе. Для расчётов использованы методы Фолленвайдера, Фолленвайдера и Диллона и метод Лозовика. Исследование проводилось на основе математических моделей, связывающих допустимые фосфорные нагрузки на водохранилища с их морфометрическими, гидрологическими и ассимиляционными характеристиками.

Результаты. Установлено статистически значимое соотношение между допустимыми фосфорными нагрузками на водохранилища и площадями их водосборов.

Теоретическая и/или практическая значимость Выявленные количественные соотношения позволяют природоохранным организациям принимать обоснованные решения о необходимом снижении антропогенной нагрузки на водохранилища.

Ключевые слова: эвтрофирование, математические модели, ассимиляционная способность, площадь водосбора

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Минпросвещения России (проект № FSZN-2020-0016).

© СС ВУ Фрумин Г. Т., Горелышев А. Ю., Кулинкович А. В., 2021.

PERMISSIBLE PHOSPHORUS LOADS ON WATER RESERVOIRS IN RUSSIA

G. Frumin¹, A. Gorelyshev², A. Kulinkovich²

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia
nab. reki Moiki 48, 19118 St. Petersburg, Russian Federation

² Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications
prosp. Bolshevikov 22-1, 193232 St. Petersburg, Russian Federation

Abstract

Aim. The purpose is to assess permissible phosphorus loads on water reservoirs in Russia.

Methodology. Allowable phosphorus loads are calculated for 21 water reservoirs, allowing the reservoirs to remain in an oligotrophic status. Calculations are performed by Follenweider, Follenweider–Dillon and Lozovik methods. The study is carried out on the basis of mathematical models linking the permissible phosphorus loads on reservoirs with their morphometric, hydrological and assimilation characteristics.

Results. A statistically significant relationship is established between the permissible phosphorus loads on reservoirs and the areas of their catchments.

Research implications. The revealed quantitative ratios allow environmental organizations to make informed decisions about the necessary reduction of anthropogenic load on reservoirs.

Keywords: eutrophication, mathematical models, assimilation capacity, catchment area.

Acknowledgments. The work was performed within the framework of a State Assignment with the financial support of the Ministry of Education of Russia (Project No. FSZN-2020-0016).

Введение

К началу XXI столетия в мире насчитывалось 3 026 водохранилищ с объёмом воды 6 329,5 км³ [1].

Интенсивное эвтрофирование водохранилищ приводит к быстрой деградации их экосистем [7; 12]. В умеренных масштабах эвтрофирование водного объекта не приносит вреда и, более того, существенно повышает продуктивность водоёма (в т. ч. и численность рыбы).

Биогенная нагрузка, превысившая критический уровень для данного водоёма, приводит к значительному снижению его биологической продуктивности и ухудшению качества воды [3].

Цель проведённого исследования заключалась в оценке допустимых фосфорных нагрузок на водохранилища России.

Расчёт допустимых фосфорных нагрузок на водохранилища

Первое приближение величины допустимой фосфорной нагрузки ($L_{\text{доп}}$, гР/м²·год), позволяющей водоёму оставаться в олиготрофном состоянии, было предложено Фолленвайдером [15]:

$$L_{\text{доп}} = 0,025 \cdot H^{0,6}, \quad (1)$$

где:

H – средняя глубина водоёма, м.

В некоторых научных работах [8; 16] выведено более общее выражение для критической фосфорной нагрузки

$$L_{\text{кр}} = [P]_{\text{кр}} \cdot H \cdot \tau \cdot (1 + \tau^{0,5}), \quad (2)$$

где:

$[P]_{кр}$ – критическая концентрация общего фосфора при весеннем перемешивании, мг/л;

H – средняя глубина водоёма, м;

τ – время полного водообмена, год.

Время пребывания воды в озере (время полного водообмена) определяется по выражению [14]:

$$\tau = \text{объём озера} : \text{ежегодный отток воды} \quad (3)$$

Критическую концентрацию фосфора в период весеннего перемешивания принимают равной 20 мкг/л. В. Г. Сойер и С. Г. Томас предложили величину 0,01 мгP/л в качестве граничной концентрации фосфора между олиготрофными и мезотрофными озёрами [2]. В этом случае выражение для допустимой фосфорной нагрузки приводится к следующему виду:

$$L_{\text{доп}} = 0,010 \cdot H / \tau \cdot (1 + \tau^{0,5}) \quad (4)$$

Как следует из приведённых формул, методика расчёта допустимой фосфорной нагрузки Фолленвайдера базируется только на 1 морфометрическом показателе (средняя глубина водоёма), а методика Фолленвайдера и Диллона – на 1 морфометрическом показателе (средняя глубина водоёма) и 1 гидрологическом показателе (время полного водообмена). Ни одна из этих методик не учитывает ассимиляционную (самоочистительную) способность водоёма.

Согласно П. А. Лозовику, за ассимиляционную (или самоочистительную) способность водного объекта следует принимать истинную скорость трансформации вещества в воде [9; 10].

Допустимая фосфорная нагрузка рассчитывается по формуле:

$$L_{\text{доп}} = A_s + L, \quad (5)$$

где:

A_s – ассимиляция фосфора в водном объекте,

L – внешняя нагрузка на водоём.

Соотношение ассимиляции и внешней нагрузки на водный объект рассчитывается по уравнению:

$$A_s / L = k(1-R)(\tau+1), \quad (6)$$

где:

k – константа скорости трансформации, год⁻¹,

R – удерживающая способность в водном объекте.

Удерживающую способность фосфора в водном объекте рассчитаем по формуле:

$$R / (1-R) = 0,14\tau + 0,49 \quad (7)$$

Найдем константу скорости трансформации:

$$k = R / \tau [1 - R \cdot \exp(-1/\tau)] \quad (8)$$

Расчёт ассимиляционной способности водного объекта (A_s):

$$A_s = k C_{\text{оз}} V_{\text{сток}} (\tau+1), \quad (9)$$

где:

$C_{\text{оз}}$ – концентрация фосфора, соответствующая олиготрофному статусу, мкг/л;

$V_{\text{сток}}$ – сток из озера, км³.

Обоснование олиготрофного статуса в качестве референтного обуслов-

лено следующим: для олиготрофных водных объектов характерно высокое содержание растворённого кислорода (95–105%), что создаёт благоприятные условия для ценных видов рыб.

Для расчёта природного содержания фосфора в водохранилище авторами данной статьи использована модель Фолленвайдера (1).

Пример:

средняя глубина Саратовского водохранилища $H = 7$ м,

площадь зеркала $S = 1830$ км²,

объём $V = 12,9$ км³.

Допустимая фосфорная нагрузка:

$L_{\text{доп}} = 0,025 \cdot H^{0,6} = 0,025 \cdot 3,21 \cdot 1830 = 147$ т

и природное (фоновое) содержание фосфора

$C_{\text{прир}} = 147/12,9 = 11,4$ мкг/л.

Первичные морфометрические и гидрологические данные водохранилищ России были заимствованы из World Lake Database (International Lake Environment Committee Foundation (ILEC)).

По представленным выше формулам (1–9) были рассчитаны допустимые фосфорные нагрузки на водохранилища России по методу Фолленвайдера, Фолленвайдера и Диллона и по методу Лозовика (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Допустимые фосфорные нагрузки на водохранилища России / Permissible phosphorus loads on water reservoirs in Russia

Водохранилище	Метод Фолленвайдера		Метод Фолленвайдера и Диллона		Метод Лозовика	
	т/год	гР/м ² -год	т/год	гР/м ² -год	т/год	гР/м ² -год
Братское	1077	0,20	2216	0,40	1566	0,29
Горьковское	111	0,07	633	0,40	1973	1,24
Имандровское	102	0,12	156	0,18	159	0,18
Камское	145	0,08	786	0,41	2128	1,11
Красноярское	436	0,22	1736	0,87	1373	0,69
Куйбышевское	580	0,10	3589	0,61	7998	1,36
Можайское	2,6	0,08	7,7	0,25	13,1	0,42
Новосибирское	101	0,09	858	0,79	2527	2,32
Пролетарское	33	0,04	27	0,03	55	0,07
Рыбинское	320	0,07	419	0,09	626	0,14
Саратовское	147	0,08	3135	1,71	24906	13,6
Шекснинское	80	0,06	107	0,08	180	0,14
Топопиозерское	130	0,13	55	0,06	54	0,05
Цимлянское	249	0,09	426	0,16	544	0,20
Устьилимское	375	0,20	1790	0,93	1699	0,88
Волгоградское	311	0,10	3265	1,05	10500	3,37
Воронежское	3,3	0,05	27	0,39	172	2,46
Воткинское	100	0,09	681	0,61	1792	1,6
Выгозерско-Ондское	105	0,08	127	0,10	160	0,13
Зейское	528	0,22	861	0,36	538	0,22
Бурейское	93	0,12	463	0,62	746	0,99

Источник: данные авторов.

Как следует из приведённых данных, величины допустимых фосфорных нагрузок на водохранилища России существенно варьируют в зависимости от метода расчёта. Например, для Саратовского водохранилища величина допустимой фосфорной нагрузки, рассчитанная по методу Фолленвайдера, равна 147 т/год, а по методу Лозовика – 24 906 т/год.

Учитывая, что озеро и его водосбор – единая природная система [4; 6; 13], целесообразно установить количественные соотношения между допустимыми фосфорными нагрузками на 21 водохранилище ($L_{\text{доп}}$) и площадями их водосборов (F). Результаты анализа приведены в табл. 2 и на рис. 1.

Таблица 2 / Table 2

Количественные соотношения между допустимыми фосфорными нагрузками на водохранилища и площадями их водосборов / Quantitative relationships between the permissible phosphorus loads on water reservoirs and the areas of their catchments

Метод	Модель	Статистические характеристики			
		n	r	$\sigma_{Y(X)}$	F_p/F_T
Фолленвайдера	$\ln L_{\text{доп}} = -0,73 + 0,49 \ln F$	21	0,67	1,13	3,6
Фолленвайдера и Диллона	$\ln L_{\text{доп}} = -2,98 + 0,78 \ln F$	21	0,92	0,68	25,5
Лозовика	$\ln L_{\text{доп}} = -3,14 + 0,85 \ln F$	21	0,93	0,69	29,4

Условные обозначения:

n – количество водохранилищ,

r – коэффициент корреляции,

$\sigma_{Y(X)}$ – стандартная ошибка,

F_p – расчётное значение критерия Фишера,

F_T – табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 95%.

Источник: составлено авторами.

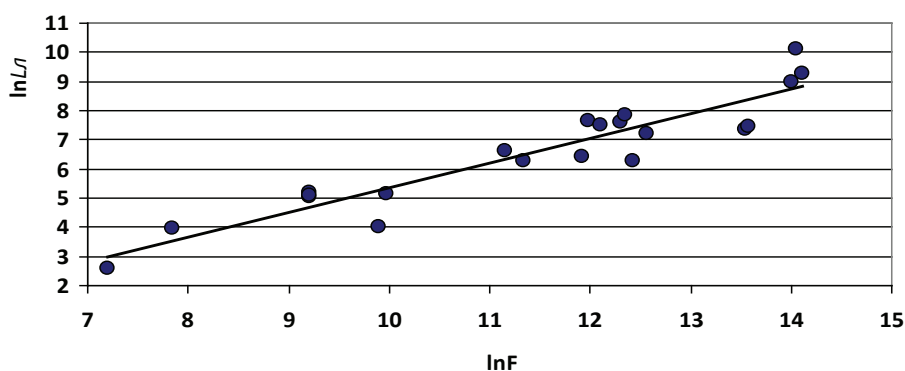


Рис. 1 / Fig. 1. Соотношение между натуральными логарифмами допустимых фосфорных нагрузок на водохранилища России и натуральными логарифмами площадей их водосборов / Relationship between natural logarithms of permissible phosphorus loads on Russian reservoirs and natural logarithms of their catchment areas.

Источник: составлено авторами.

Согласно шкале Чеддока [11], приведённые в табл. 2 значения коэффициентов корреляции свидетельствуют о «весьма высокой» связи между переменными ($\ln L_{доп}$ и $\ln F$). Наиболее высокие значения коэффициента корреляции и критерия Фишера установлены при применении метода Лозовика. Кроме того, все модели адекватны ($F_p > F_T$) [5].

Выводы

1. Достоверность определения величины допустимой фосфорной нагрузки на водохранилища, позволяющая им оставаться в олиготрофном статусе, зависит от метода расчёта, базирующегося на математической модели.

2. Методика расчёта допустимой фосфорной нагрузки Фолленвайдера базируется только на 1 морфометрическом показателе (средняя глубина водоёма), а методика Фолленвайдера и Диллона – на 1 морфометрическом показателе (средняя глубина водоёма) и 1 гидрологическом показателе (время

полного водообмена). Ни одна из этих методик не учитывает ассимиляционную (самоочистительную) способность водоёма.

3. Отличительной особенностью метода расчёта допустимых фосфорных нагрузок на озёра Карелии, разработанного П. А. Лозовиком, является то, что он учитывает не только морфометрические и гидрологические характеристики водного объекта, но и его ассимиляционную (самоочистительную) способность в отношении соединений фосфора в отличие от традиционно используемых методов Фолленвайдера и Диллона.

4. Установлены допустимые фосфорные нагрузки на 21 водохранилище России и на площади их водосборов, что позволяет природоохранным организациям принимать обоснованные решения о необходимом снижении антропогенной нагрузки на эти водохранилища.

Статья поступила в редакцию 05.04.2021

ЛИТЕРАТУРА

1. Авакян А. Б., Лебедева И. П. Водоохранилища XX века как глобальное географическое явление // Известия Российской Академии наук. Серия: Географическая. 2002. № 3. С. 13–20.
2. Гусаков Б. Л. Критическая концентрация фосфора в озерном притоке и её связь с трофическим уровнем водоёма. Л.: Наука, 1987. С. 7–17.
3. Даценко Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.
4. Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор – единая природная система. Л.: Наука, 1979. 195 с.
5. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.
6. Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоём. СПб.: Нестор-История, 2019. 248 с.
7. Кренева С. В. Применение принципа сукцессионного анализа для оценки и прогноза состояния водных экосистем: автореф. дис. ... д-ра биол. наук. М., 2002. 51 с.
8. Кривоускова Е. В., Цветкова Н. Н. Предварительная оценка критической фосфорной нагрузки на озеро Виштынецкое (Калининградская область) // Известия КГТУ. 2017. № 45. С. 83–92.

9. Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Известия Российской Академии наук. 2011. № 4. С. 21–28.
10. Лозовик П. А., Фрумин Г. Т. Современное состояние и допустимые биогенные нагрузки на Псковско-Чудское озеро // Труды Карельского научного центра Российской Академии наук. 2018. № 3. С. 3–10.
11. Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.
12. Фрумин Г. Т., Мурадлы М. А. Динамика трофического статуса Нарвского водохранилища (по данным 2011–2019 гг.) // Труды Карельского научного центра Российской Академии наук. 2020. № 9. С. 65–71.
13. Фрумин Г. Т., Куликович А. В., Горельшев А. Ю. Методы расчёта допустимых фосфорных нагрузок на озера // Труды Карельского научного центра Российской Академии наук. 2021. № 4. С. 163–168.
14. Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озёра. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.
15. Vollenweider R. A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. Paris, 1968. 159 p.
16. Vollenweider R. A., Dillon P. I. The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research. Canada, 1974. 42 p.

REFERENCES

1. Avakyan A. B., Lebedeva I. P. [Water reservoirs of the 20th century as a global geographic phenomenon]. In: *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. Seriya Geograficheskaya* [News of the Russian Academy of Sciences. Series Geographical], 2002, no. 3, pp. 13–20.
2. Gusakov B. L. *Kriticheskaya kontsentratsiya fosfora v ozernom pritoke i ee svyaz' s troficheskimi urovnyami vodoema* [Critical concentration of phosphorus in the lake tributary and its relationship with the trophic level of the reservoir]. Leningrad, Nauka Publ., 1987. P. 7–17.
3. Datsenko Yu. S. *Evtrofirovaniye vodokhranilishch. Gidrologo-gidrokhimicheskie aspekty* [Eutrophication of water reservoirs. Hydrological and hydrochemical aspects]. Moscow, GEOS Publ., 2007. 252 p.
4. Drabkova V. G., Sorokin I. N. *Ozero i ego vodosbor – edinaya prirodnyaya sistema* [Lake and its catchment – unified natural system]. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 195 p.
5. Draper N., Smith H. Applied regression analysis. New York, John Wiley and Sons, 1998. 736 p.
6. Kondratev S. A., Shmakova M. V. *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v sisteme vodosbor – vodotok – wodoem* [Mathematical modeling of mass transfer in the catchment – watercourse – water body]. S.Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2019. 248 p.
7. Kreneva S. V. *Primeneniye printsipa suksessionnogo analiza dlya otsenki i prognoza sostoyaniya vodnykh ekosistem: avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk* [Application of the principle of successive analysis for assessing and forecasting the state of aquatic ecosystems: Abstract of Cand. Sci. thesis in Biological Sciences]. Moscow, 2002. 51 p.
8. Krivopuskova E. V., Tsvetkova N. N. [Preliminary assessment of the critical phosphorus load on Lake Vishtynetskoe (Kaliningrad region)]. In: *Izvestiya KGTU* [KSTU News], 2017, no. 45, pp. 83–92.
9. Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Sabylina A. V. [The processes of transformation, circulation and formation of substances in natural waters]. In: *Rossiiskoi Akademii nauk* [Russian Academy of Sciences], 2011, no. 4, pp. 21–28.

10. Lozovik P. A., Frumin G. T. [Current state and permissible nutrient loads on Lake Pskov-Peipsi]. In: *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi Akademii nauk* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, no. 3, pp. 3–10.
11. Makarova N. V., Trofimets V. Ya. *Statistika v Excel* [Statistics in Excel]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002. 368 p.
12. Frumin G. T., Muradly M. A. [Dynamics of the trophic status of the Narva reservoir (according to data from 2011–2019)]. In: *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi Akademii nauk* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2020, no. 9, pp. 65–71.
13. Frumin G. T., Kulinkovich A. V., Gorelyshev A. Yu. [Methods for calculating permissible phosphorus loads on lakes]. In: *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi Akademii nauk* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2021, no. 4, pp. 163–168.
14. Khenderson-Sellers B., Marklend Kh. R. *Umirayushchie ozera. Prichiny i kontrol' antropogennogo evtrofirovaniya* [Dying lakes. Causes and control of anthropogenic eutrophication]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 280 p.
15. Vollenweider R. A. *Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication*. Paris, 1968. 159 p.
16. Vollenweider R. A., Dillon P. I. *The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research*. Canada, 1974. 42 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фрумин Григорий Тевелевич – доктор химических наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории факультета географии Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена;
e-mail: gfrumin@mail.ru

Кулинкович Алексей Викторович – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры экологической безопасности телекоммуникаций факультета радиотехнологий связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникации имени проф. М. А. Бонч-Бруевича;
e-mail: geochem@mail.ru

Горельшиев Алексей Юрьевич – старший преподаватель кафедры экологической безопасности телекоммуникаций факультета радиотехнологий связи Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникации имени проф. М. А. Бонч-Бруевича;
e-mail: gau7001@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigory T. Frumin – Dr. Sci. (Chemical), Prof., Leading Researcher, Research Laboratory of the Faculty of Geography, Herzen Russian State Pedagogical University of Russia;
e-mail: gfrumin@mail.ru

Alexey V. Kulinkovich – Cand. Sci. (Chemical), Assoc. Prof., Department of Environmental Security of Telecommunications, Faculty of Radiotechnologies of Communication, Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications;
e-mail: geochem@mail.ru

Alexey Yu. Gorelyshev – Senior Lecturer, Department of Environmental Security of Telecommunications, Faculty of Radiotechnologies of Communication, Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications;
e-mail: gau7001@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Фрумин Г. Т., Горельшев А. Ю., Кулинкович А. В. Допустимые фосфорные нагрузки на водохранилища России // Географическая среда и живые системы. 2021. № 2. С. 6–14.
DOI: 10.18384/2712-7621-2021-2-6-14

FOR CITATION

Frumin G. T., Gorelyshev A. Yu., Kulinkovich A. V. Permissible phosphorus loads on water reservoirs in Russia. In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2021, no. 2, pp. 6–14.
DOI: 10.18384/2712-7621-2021-2-6-14