

УДК 504

DOI: 10.18384/2712-7621-2023-1-23-31

О РАСЧЁТЕ ДОПУСТИМЫХ ФОСФОРНЫХ НАГРУЗОК НА ОЗЁРНЫЕ БАССЕЙНЫ

Фрумин Г. Т.¹, Куликович А. В.², Маликов У. М.²

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

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

Аннотация

Цель. Определить допустимые фосфорные нагрузки на озёрные бассейны.

Процедура и методы. Для 18 крупных озёр, расположенных в России, Швеции, Финляндии, Венгрии, Италии, Норвегии и Эстонии, рассчитаны ориентировочные величины допустимых фосфорных нагрузок, позволяющих им оставаться в олиготрофном статусе. Рассмотренные озёра существенно различаются площадями водной поверхности (в 121,2 раза), объёмом (в 1197,4 раза) и средней глубиной (в 63 раза). Для расчётов был применён метод П. А. Лозовика, отличительная особенность которого, по сравнению с традиционно используемыми методами Фолленвайдера и Фолленвайдера и Диллона, заключается в том, что он комплексно учитывает не только морфометрические (среднюю глубину, площадь зеркала) и гидрологические (время полного водообмена) характеристики водного объекта, но и его ассимиляционную (самоочистительную) способность в отношении соединений фосфора. Для удобства расчётов была использована разработанная авторами данной статьи «Программа расчёта допустимых фосфорных нагрузок на пресноводные озера»¹.

Результаты. На примере 18 крупных озёр установлено статистически значимое соотношение между натуральными логарифмами допустимых фосфорных нагрузок на эти озёра и площадями их водосборов. Выявленное соотношение адекватно, характеризуется высокой теснотой связи между переменными по шкале Чеддока и пригодно для предсказания допустимых фосфорных нагрузок на озёра и водохранилища. Рассчитаны ориентировочные величины допустимых фосфорных нагрузок на 3 крупных озера Вологодской области и 8 крупных озёр Мурманской области.

Теоретическая и/или практическая значимость. Выявленные количественные соотношения позволяют природоохранным органам и специалистам повысить эффективность и надёжность принимаемых решений о необходимом уровне деэвтрофирования рассматриваемых озёр путём снижения антропогенной фосфорной нагрузки со стоком от точечных и диффузных источников.

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

© СС ВУ Фрумин Г. Т., Куликович А. В., Маликов У. М., 2023.

¹ Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Государственная регистрация программы для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2021618650. Дата регистрации 31.05.2021.

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

ASSESSMENT OF PERMISSIBLE PHOSPHORUS LOADS ON LAKE BASINS

G. Frumin¹, A. Kulinkovich², U. Malikov²

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia
Naberezhnaya reki Moiki 48, Saint Petersburg 191186, Russian Federation

² St. Petersburg State University of Telecommunications
named after Professor M. A. Bonch-Bruevich
pr. Bolshevikov 22-1, St. Petersburg 193232, Russian Federation

Abstract

Aim. The purpose is to assess allowable phosphorus loads on lake basins.

Methodology. For 18 large lakes located in Russia, Sweden, Finland, Hungary, Italy, Norway, and Estonia, we estimate values of allowable phosphorus loads, allowing them to remain in an oligotrophic status. The considered lakes significantly differ in water surface areas (by 121.2 times), volume (by 1197.4 times) and average depth (by 63 times). For calculations, the method of P. A. Lozovik, the distinctive feature of which, compared with the traditionally used methods of Follenweider and Follenweider and Dillon, is that it comprehensively takes into account not only the morphometric (average depth, surface area) and hydrological (time of complete water exchange) characteristics of a water body, but also its assimilation (self-cleaning) ability in relation to phosphorus compounds. For the convenience of calculations, we used our program "Program for calculating the allowable phosphorus loads on freshwater lakes"¹.

Results. In a number of cases, the lack of initial hydrological data, especially on water runoff from lakes, does not allow the wide use of P. A. Lozovik's method. Taking into account that the lake and its watershed are a single natural system, a hypothesis is formulated about the possible existence of a quantitative relationship between the values of permissible phosphorus loads on lakes and the areas of their watersheds. On the example of 18 large lakes, a statistically significant relationship was established between the natural logarithms of the allowable phosphorus loads on these lakes and their catchment areas. The revealed relationship is adequate, characterized by a high closeness of the relationship between the variables on the Chaddock scale and is suitable for predicting the allowable phosphorus loads on lakes and reservoirs. Approximate values of permissible phosphorus loads on three large lakes of the Vologda region and eight large lakes of the Murmansk region were calculated.

Research implications. The revealed quantitative ratios allow environmental authorities and specialists to improve the efficiency and reliability of decisions made on the required level of deeutrophication of the lakes under consideration by reducing the anthropogenic phosphorus load with runoff from point and diffuse sources.

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

Acknowledgments. The work was carried out within the framework of a state assignment with the financial support of the Ministry of Education of Russia (project No. FSN-2020-0016).

¹ Federal Service for Intellectual Property. State registration of the computer program. Registration number (certificate): 2021618650. Registration date 31.05.2021.

Введение

Среди основных проблем лимнологии центральное место для многих озёр мира занимает проблема эвтрофирования [8–9, 11–12]. Согласно ГОСТу 17.1.1.01-77 «эвтрофированием называется повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления биогенных элементов под действием антропогенных или естественных факторов». Для водоёмов в зоне умеренного климата лимитантом первичной продукции экосистем является фосфор [9].

Согласно Фолленвайдеру *допустимая нагрузка* – это нагрузка, меньше которой трофический статус водоёма характеризуется как олиготрофный [1]. Олиготрофные водные объекты

характеризуются высоким содержанием растворённого в воде кислорода (95–105% относительно нормального содержания кислорода при данной температуре) и, соответственно, благоприятными условиями для особо ценных видов рыб (осетровые, карповые, лососевые и т. д.).

Для расчётов допустимых фосфорных нагрузок были отобраны озёра, существенно (в 121,2 раза) различающиеся площадями водной поверхности (зеркалами), объёмом (в 1197,4 раза) и средней глубиной (в 63 раза) (табл. 1).

Для расчётов был применён метод П. А. Лозовика [4–5]. Этот метод может быть использован для оценки допустимых фосфорных нагрузок не только для пресноводных озёр, но и водохра-

Таблица 1 / Table 1

Морфометрия крупных озёр / Morphometry of large lakes

Озеро	Страна	Площадь зеркала, S, км ²	Объём, V, км ³	Средняя глубина, Н, м
Ладожское	Россия	17700	910	51
Онежское	Россия	9720	295	30
Венерн	Швеция	5650	153	27
Сайма	Финляндия	4380	36	17
Чудское	Россия/Эстония	2613	21,8	7,5
Веттерн	Швеция	1912	77	41
Белое	Россия	1290	5,2	4,1
Выгозеро	Россия	1251	7,2	5,8
Меларен	Швеция	1140	13,6	11,9
Пяйянне	Финляндия	1100	17,8	17
Ильмень	Россия	1100	2,85	3,5
Инари	Финляндия	1050	15,1	14,4
Балатон	Венгрия	593	1,9	3,25
Гарда	Италия	370	49	136
Мьоса	Норвегия	365	56,2	153
Вортсъярв	Эстония	271	0,76	2,8
Маджоре	Италия	213	37,5	176,5
Комо	Италия	146	22,5	153

Источник: составлено авторами по [7]

нилищ. Отличительная особенность метода, разработанного П. А. Лозовиком, по сравнению с традиционно используемыми методами Фолленвайдера и Фолленвайдера и Диллона, заключается в том, что он комплексно учитывает не только морфометрические (средняя глубина, площадь зеркала) и гидрологические (время полного водообмена) характеристики водного объекта, но и его ассимиляционную (самоочистительную) способность в отношении соединений фосфора.

Время полного водообмена рассчитывается как отношение объёма водного объекта к ежегодному оттоку (стоку) воды. Ассимиляционная способность в отношении соединений фосфора является производной таких показателей, как время полного водообмена, константы скорости трансформации, концентрации фосфора, соответствующей олиготрофному статусу, и стока [4–5]. Иными словами, для расчётов по методу П. А. Лозовика необходимы и достаточны данные о морфометрических и гидрологических характеристиках исследуемых водоемов, включая стоки воды.

Морфометрические и гидрологические данные, а также площади водосборов рассмотренных озёр, были заимствованы из базы данных International Lake Environment Committee Foundation (ILEC). Данные по морфометрии озёр Мурманской и Вологодской областей, также использующихся в исследовании, приведены из Экологического каталога озёр Мурманской области¹ и книги «Озёра европейской части России» [10].

¹ Аннотированный экологический каталог озёр Мурманской области: центральный и юго-западный районы Мурманской области

Для удобства расчётов была использована специальная программа, разработанная авторами данной статьи, – «Программа расчёта допустимых фосфорных нагрузок на пресноводные озера».

Расчёт допустимых фосфорных нагрузок на озёрные бассейны

Фактор доступности исходных данных, в особенности по гидрологическим характеристикам озёр, не позволяет широко использовать указанный метод. К примеру, в справочной литературе, как правило, не приводятся данные о стоке из озёр Мурманской области.

В связи с этим авторами данной статьи была рассмотрена гипотеза о возможном наличии количественного соотношения между величинами $L_{\text{доп}}$ и F .

Поскольку «озеро и его водосбор – единая природная система» [2], представлялось интересным выявить количественные соотношения между допустимыми фосфорными нагрузками на 18 озёр ($L_{\text{доп}}$) и площадями их водосборов (F) (табл. 2).

Объём выборки (18 озёр) достаточен для получения статистически достоверных результатов, поскольку для получения таких результатов надо иметь не менее 5 значений функции отклика ($L_{\text{доп}}$) на каждый используемый в уравнении параметр (F) [13].

По данным, приведённым в таблице 2, было установлено статистически значимое соотношение между натуральными логарифмами $L_{\text{доп}}$ и F :

(бассейны Баренцева и Белого морей и Ботнического залива Балтийского моря). Ч. 2. / Н. А. Кашулин., С. С. Сандимиров, В. А. Даувальтер, Л. П. Кудряцева, П. М. Терентьев, Д. Б. Денисов, О. И. Вандыш и др. Апатиты, 2013. 253 с.

$$\ln L_{\text{доп}} = -4,69 + 1,03 \ln F \quad (*)$$

$$n = 18; r = 0,90; r^2 = 0,81; \sigma_{Y(X)} = 0,58; F_p = 67,7; F_T = 4,45$$

где:

n – количество озёр;

r – коэффициент корреляции;

r^2 – коэффициент детерминации;

$\sigma_{Y(X)}$ – стандартная ошибка;

F_p и F_T – расчётное и табличное значение критерия Фишера (уровень значимости $\alpha=5\%$).

Зависимость $\ln L_{\text{доп}}$ от $\ln F$ адекватна ($F_p > F_T$) [3].

Таблица 2 / Table 2

Допустимые фосфорные нагрузки на крупные озёра и площади их водосборов /
Permissible phosphorus loads on large lakes and their catchment areas

Озеро	Допустимая фосфорная нагрузка, $L_{\text{доп}}$, т	Площадь водосбора, F , км ²	Озеро	Допустимая фосфорная нагрузка, $L_{\text{доп}}$, т	Площадь водосбора, F , км ²
Ладожское	1993	70120	Пяйянне	156	25400
Онежское	736	51540	Ильмень	1548	67200
Венерн	514	47000	Инари	114	13400
Сайма	932	61054	Балатон	40	5181
Чудское	327	40000	Гарда	60	2350
Веттерн	153	4503	Мьоса	113	16420
Белое	198	14000	Вортсъярв	32	3100
Выгозеро	327	16800	Маджоре	33	6387
Меларен	154	21460	Комо	54	4572

Источник: составлено авторами

Согласно шкале Чеддока приведённое значение коэффициента корреляции ($r = 0,90$) свидетельствует о «высокой» тесноте связи между $\ln L_{\text{доп}}$ и $\ln F$ [6].

Кроме того, поскольку $F_p/F_T > 4$, соотношение между натуральными логарифмами $L_{\text{доп}}$ и F пригодно для ориентировочного прогнозирования величин $L_{\text{доп}}$ по уравнению (*) при наличии данных о площадях водосборов других озёр (F) (табл. 3–4).

В таблице 3 для сопоставления приведены величины допустимых фос-

форных нагрузок на озёра Вологодской области, рассчитанные методом П. А. Лозовика и предлагаемым упрощённым методом, базирующемся только на одном параметре – площади водосбора.

Отношения $L_{\text{доп}}$, рассчитанных методом П. А. Лозовика и методом авторов, составляет 0,88 для Кубенского озера и 1,15 – для Белого озера, что можно рассматривать как вполне удовлетворительные значения. Для оз. Воже это отношение составляет 1,79, что, возможно, обусловлено комплексом ланд-

шафтно-географических особенностей озерного бассейна. Так, в пользу влияния фактора ландшафтных условий в данном случае косвенно свидетельствует то обстоятельство, что во-

досбор оз. Воже, в сравнении с двумя другими, слабее расчленён и сильнее заболочен. Другой аспект – малый объём выборки (3 озера Вологодской области).

Таблица 3 / Table 3

Ориентировочные величины $L_{\text{доп}}$ для некоторых озёр Вологодской области /
Approximate values L_{add} for some lakes of the Vologda region

Озеро	$F, \text{ км}^2$	$L_{\text{доп}}, \text{ т}$ (метод Лозовика)	$L_{\text{доп}}, \text{ т}$ (авторский метод)
Кубенское	14700	158	180
Белое	14000	196	171
Воже	6260	134	75

Источник: составлено авторами

Таблица 4 / Table 4

Ориентировочные величины $L_{\text{доп}}$ для некоторых озёр Мурманской области /
Approximate values L_{add} for some lakes of the Murmansk region

Озеро	$F, \text{ км}^2$	$L_{\text{доп}}, \text{ т}$
Имандра	12342	150
Ловозеро	3770	44,3
Лумболка	1618	18,6
Мончезеро	1584	18,1
Толванд	975	11,0
Печозеро	653	7,3
Круглое	516	5,7
Куна	348	3,8

Источник: составлено авторами

В качестве примера практического использования авторского подхода представлены результаты для ряда озёр Мурманской области, по которым даны для расчёта допустимой нагрузки по методу П. А. Лозовика недостаточно.

Предлагаемый метод расчёта $L_{\text{доп}}$ не ограничен диапазоном площадей водосборов озёр. Это утверждение базируется на результатах следующих расчётов: по данным таблицы 2 по

формуле (*) были рассчитаны величины $L_{\text{доп}}$ по авторскому методу. Затем были найдены отношения $L_{\text{доп}}$ методом П. А. Лозовика и методом авторов статьи. Среднее значение этого отношения для 18 озёр – 1,2, что можно рассматривать как вполне удовлетворительное, учитывая, что площадь водосбора Ладожского озера 70 120 км², а оз. Гарда – 2 350 км² (различие в 29,8 раз).

Дальнейшее развитие предложенного метода предполагает учёт факторов

различия ландшафтных особенностей озёрных бассейнов (густота речной сети, болотистость, доля урбанизированных территорий и т. п.).

Заключение

Для 18 крупных озёр, расположенных в России, Финляндии, Эстонии, Норвегии, Италии, Венгрии и Швеции, методом П. А. Лозовика рассчитаны допустимые фосфорные нагрузки, что позволяет специалистам повысить эффективность и надёжность принимаемых решений о необходимом уровне деэвтрофирования этих озёр путём снижения антропогенной фосфорной нагрузки со стоком от точечных и диффузных источников.

В ряде случаев отсутствие исходных гидрологических данных, в особенности по стоку воды из озёр, не позволяет широко использовать метод П. А. Лозовика. В связи с этим рассмотрена гипотеза о возможном наличии количественного соотношения между величинами $L_{\text{доп}}$ и F . Выявлено линейное статистически значимое (адекватное) соотношение между натуральными логарифмами $L_{\text{доп}}$ и F . Использование этого соотношения позволяет рассчитать ориентировочные величины допустимых фосфорных нагрузок для тех озёр, для которых установлены величины площадей водосборов.

Статья поступила в редакцию 26.07.2022

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусаков Б. Л. Критическая концентрация фосфора в озерном притоке и ее связь с трофическим уровнем водоема // Элементы круговорота фосфора в водоёмах / под ред. Н. А. Петровой, Б. Л. Гутельмахера. Л.: Наука, 1987. С. 7–17.
2. Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор – единая природная система. Л.: Наука, 1979. 195 с.
3. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.
4. Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Труды Карельского научного центра РАН, 2011. № 4. С. 21–28.
5. Лозовик П. А., Фрумин Г. Т. Современное состояние и допустимые биогенные нагрузки на Псковско-Чудское озеро // Труды Карельского научного центра РАН. 2018. № 3. С. 3–10.
6. Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.
7. Мякишева Н. В. Многокритериальная классификация озёр. СПб.: РГГМУ, 2009. 160 с.
8. Неверова-Дзиопик Е., Цветкова Л. Т. Оценка трофического состояния поверхностных вод: монография. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 176 с.
9. Россолимо Л. Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 144 с.
10. Румянцев В. А., Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Озёра европейской части России. СПб.: ЛЕМА, 2015. 392 с.
11. Фрумин Г. Т., Гильдеева И. М. Эвтрофирование водоёмов – глобальная экологическая проблема // Экологическая химия, 2013. Т. 22. № 4. С. 191–197.
12. Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озёра. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.
13. Topliss J. G., Costello R. J. Chance correlation in structure-activity studies using multiple regression analysis // Journal of Medical Chemistry. 1972. Vol. 15. № 10. P. 1065–1068.

REFERENCES

1. Gusakov B. L. [Critical concentration of phosphorus in the lake inflow and its connection with the trophic level of the reservoir]. In: Petrova N. A., Gutelmakher B. L., eds. *Elementy krugovorota fosfora v vodoemakh* [Elements of phosphorus circulation in water bodies]. Leningrad, Nauka Publ., 1987, pp. 7–17.
2. Drabkova V. G., Sorokin I. N. *Ozero i ego vodosbor – edinaya prirodnyaya sistema* [A lake and its catchment area as a single natural system]. Leningrad, Nauka Publ., 1979. 195 p.
3. Dreyper N., Smit G. *Prikladnoi regressiynnyi analiz* [Applied regression analysis]. Moscow, Statistics Publ., 1973. 392 p.
4. Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Sabylina A. V. [Processes of transformation, circulation and formation of substances in natural waters]. In: *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2011, no. 4, pp. 21–28.
5. Lozovik P. A., Frumin G. T. [Current state and allowable biogenic load on the Pskovsko-Peipsi lake] In: *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2018, no. 3, pp. 3–10.
6. Makarova N. V., Trofimets V. Ya. *Statistika v Excel* [Statistics in Excel]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002. 368 p.
7. Myakisheva N. V. *Mnogokriterialnaya klassifikatsiya ozer* [Multi-criteria classification of lakes]. St. Petersburg, RGGMU Publ., 2009. 160 p.
8. Neverova-Dziopik E., Tsvetkova L. T. *Otsenka troficheskogo sostoyaniya poverkhnostnykh vod: monografiya* [Evaluation of the trophic state of surface waters: monograph]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2020. 176 p.
9. Rossolimo L. L. *Izmenenie limnicheskikh ekosistem pod vozdeistviem antropogennogo faktora* [Changes in limnic ecosystems under the influence of the anthropogenic factor]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 144 p.
10. Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmaylova A. V. *Ozera evropeiskoi chasti Rossii* [Lakes of the European part of Russia]. St. Petersburg, LEMA Publ., 2015. 392 p.
11. Frumin G. T., Gildeyeva I. M. [Eutrophication of water bodies as a global environmental problem] In: *Ekologicheskaya khimiya* [Ecological chemistry], 2013, vol. 22, no. 4, pp. 191–197.
12. 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.
13. Topliss J. G., Costello R. J. Chance correlation in structure-activity studies using multiple regression analysis. In: *Journal of Medical Chemistry*, 1972, vol. 15, no. 10, pp. 1065–1068.

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

Куликович Алексей Викторович – кандидат химических наук, доцент, доцент кафедры экологической безопасности телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича;
e-mail: geochem@mail.ru

Маликов Умар Маннонович – кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры экологической безопасности телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций имени профессора М. А. Бонч-Бруевича;
e-mail: umalik@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

Alexey V. Kulinkovich – PhD in Chemistry, Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Ecological Telecommunications Security, St. Petersburg State University of Telecommunications named after Professors M. A. Bonch-Bruevich;
e-mail: geochem@mail.ru

Umar M. Malikov – PhD in Biology, Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of Ecological Safety of Telecommunications, St. Petersburg State University of Telecommunications named after Professor M. A. Bonch-Bruevich;
e-mail: umalik@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Фрумин Г. Т., Кулинкович А. В., Маликов У. М. О расчёте допустимых фосфорных нагрузок на озёрные бассейны // Географическая среда и живые системы. 2023. № 1. С. 23–31.
DOI: 10.18384/2712-7621-2023-1-23-31

FOR CITATION

Frumin G. T., Kulinkovich A. V., Malikov U. M. Assessment of permissible phosphorus loads on lake basins. In: *Geographical Environment and Living Systems*, 2023, no. 1, pp. 23–31.
DOI: 10.18384/2712-7621-2023-1-23-31