

УДК 504

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА ДОПУСТИМЫХ ФОСФОРНЫХ НАГРУЗОК НА ОЗЕРА

Г. Т. Фрумин<sup>1</sup>, А. В. Кулинкович<sup>2</sup>, А. Ю. Горелышев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Россия

Проведен анализ трех методов расчета допустимых фосфорных нагрузок на озера, расположенные в различных природно-климатических зонах России (метод Фолленвайдера, метод Фолленвайдера и Диллона, метод Лозовика). Установлена статистически значимая зависимость между допустимыми фосфорными нагрузками на десять озер России и площадями их водосборов.

**Ключевые слова:** озеро; эвтрофирование; допустимые фосфорные нагрузки; ассимиляционная способность; площадь водосбора.

### G. T. Frumin, A. V. Kulinkovich, A. Yu. Gorelyshev. METHODS FOR CALCULATING PERMISSIBLE PHOSPHORUS LOADINGS ON LAKES

Three methods for calculating permissible phosphorus loadings on lakes located in different natural and climatic zones of Russia were analyzed (the Vollenweider method, the Vollenweider and Dillon method, the Lozovik method). A statistically significant relationship was found to exist between the permissible phosphorus loadings on ten lakes in Russia and the size of their catchments.

**Key words:** lake; eutrophication; permissible phosphorus loading; assimilation capacity; catchment size.

### Введение

Среди шести основных проблем лимнологии, сформулированных Международным лимнологическим комитетом (эвтрофирование, флуктуации уровня воды, ацидификация, токсификация, заиливание, разрушение озерных экосистем), центральное место для многих озер мира занимает проблема эвтрофирования [Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990; Науменко, 2007; Фрумин, Гильдеева, 2013]. Если в естественных условиях эвтрофирование ка-

кого-либо озера протекает за время 1000 лет и более, то в результате антропогенного воздействия это может произойти в сто и даже тысячу раз быстрее. Такие крупные водоемы, как Балтийское море, озера Эри, Тахо и Ладожское, перешли из одного трофического статуса в другой всего за 20–25 лет. Данный процесс охватил многие крупнейшие пресноводные озера Европы, США, Канады и Японии.

По образному выражению Ю. Одума, «антропогенное эвтрофирование есть злокачественное увеличение первичной продукции в во-

доеме» [Одум, 1986]. Развитие процесса антропогенного эвтрофирования приводит к многим неблагоприятным последствиям с точки зрения водопользования и водопотребления (развитие «цветения» и ухудшение качества воды, появление анаэробных зон, нарушение структуры биоценозов и исчезновение многих видов гидробионтов, в том числе ценных промысловых рыб). Сине-зеленые водоросли в результате своей жизнедеятельности производят сильнейшие токсины (алкалоиды, низкомолекулярные пептиды и др.), которые, попадая в водную толщу, представляют опасность для живых организмов и человека. Токсины могут вызывать цирроз печени, дерматиты у людей, отравление и гибель животных. Цианобактерии *Microcystis aeruginosa* выделяют токсины, которые могут повредить печень, кишечный тракт и нервную систему. В мае 2007 г. масштабное цветение *Microcystis* поразило систему водоснабжения города Уси на северном берегу озера Тайху (Китай), оставив более 2 миллионов человек без питьевой воды на неделю.

В условиях антропогенного воздействия степень эвтрофирования водоема в основном определяется поступлением в водоем биогенных веществ, в первую очередь соединений фосфора [Гусаков, 1987]. Для водоемов умеренной зоны решающая роль фосфора, определяющего скорость развития планктонных водорослей, может считаться доказанной [Россолимо, 1977].

Цель исследования – анализ методов расчета допустимых фосфорных нагрузок на озеро.

## Материалы и методы

Исследование зависимости трофического статуса водоема (олиготрофный, мезотрофный, эвтрофный) от количества поступающего в него фосфора привело к разработке нагрузочной концепции, в основу которой положено представление о наличии количественной связи между величиной поступления (экспорта) этого элемента и реакцией водоема.

Первое приближение величины допустимой фосфорной нагрузки ( $L_{\text{доп}}$ , г Р/м<sup>2</sup>·год), позволяющей водоему оставаться в олиготрофном состоянии, было предложено Фолленвайдером [Vollenweider, 1968]:

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

где  $H$  – средняя глубина водоема, м.

В работе [Vollenweider, Dillon, 1974] выведено более общее выражение для критической фосфорной нагрузки:

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

где  $[P]_{\text{кр}}$  – критическая концентрация общего фосфора при весеннем перемешивании, мг/л;  $H$  – средняя глубина водоема, м;  $\tau$  – время полного водообмена, год.

Время пребывания воды в озере (время полного водообмена) определяется по выражению [Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990]:

$$\tau = \text{объем озера} : \text{ежегодный отток воды}. \quad (2)$$

Критическую концентрацию фосфора в период весеннего перемешивания принимают равной 20 мкг/л. Сойером и Томасом в качестве граничных концентраций фосфора между олиготрофными и мезотрофными озерами была предложена величина 0,01 мг Р/л [Гусаков, 1987]. В этом случае выражение для допустимой фосфорной нагрузки приводится к следующему виду:

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

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

Согласно П. А. Лозовику, за ассимиляционную (или самоочистительную) способность водного объекта следует принимать истинную скорость трансформации вещества в воде [Лозовик и др., 2011]. Допустимая фосфорная нагрузка рассчитывается по следующей формуле:

$$L_{\text{доп}} = A_s + L,$$

где  $A_s$  – ассимиляция фосфора в водном объекте,  $L$  – внешняя нагрузка на водоем.

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

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

где  $k$  – константа скорости трансформации, год<sup>-1</sup>,  $R$  – удерживающая способность в водном объекте.

Удерживающая способность фосфора в водном объекте рассчитывается по формуле:

$$R/1 - R = 0,14\tau + 0,49. \quad (3)$$

Константу скорости трансформации можно рассчитать, используя следующую формулу:

$$k = R/\tau [1 - R \cdot \exp(-1/\tau)]. \quad (4)$$

Расчет ассимиляционной способности водного объекта ( $A_s$ ):

$$A_s = kC_{оз} V_{сток} (\tau + 1),$$

где  $C_{оз}$  – концентрация фосфора, соответствующая олиготрофному статусу, мкг/л;  $V_{сток}$  – сток из озера, км<sup>3</sup>.

П. А. Лозовиком сформулирован принцип сохранения геохимического класса вод, согласно которому «допустимая антропогенная нагрузка на водоем не должна приводить к  $\sqrt{2.5}$ -кратному увеличению концентрации вещества по сравнению с его природным содержанием» [Лозовик, 2006].

Для расчета природного содержания фосфора в водоеме авторами данной статьи использована модель Фолленвайдера (1). К примеру, средняя глубина озера Имандра  $H = 16$  м, площадь зеркала  $S = 876$  км<sup>2</sup>, объем  $V = 11,2$  км<sup>3</sup>. Допустимая фосфорная нагрузка

$$L_{доп} = 0,025 H^{0,6} = 0,025 \cdot 160,6 \cdot 876 = 115,6 \text{ т}$$

и природное (фоновое) содержание фосфора

$$C_{прир} = 115,6/11,2 = 10,3 \text{ мкг/л (табл. 1)}.$$

Для расчетов допустимых фосфорных нагрузок на некоторые озера в табл. 2 приведены их морфометрические и гидрологические характеристики.

Таблица 1. Концентрации фосфора в озере, соответствующие олиготрофному трофическому статусу

Table 1. Concentrations of phosphorus in a lake corresponding to the oligotrophic trophic status

Озеро Lake	Концентрация, мкг/л Concentration, µg/L	Озеро Lake	Концентрация, мкг/л Concentration, µg/L
Телецкое Teletskoe	3,1	Нотозеро Notozero	8,2
Онежское Onego	6,3	Чудское Chudskoe	10,0
Ладожское Ladoga	5,1	Селигер Seliger	15,3
Имандра Imandra	10,3	Крошноезеро Kroshnozero	12,5
Топозеро Topozero	8,3	Белое Beloe (White)	14,4

Таблица 2. Морфометрические и гидрологические характеристики озер

Table 2. Morphometric and hydrological characteristics of the lakes

Озеро Lake	Средняя глубина, м Average depth, m	Объем, км <sup>3</sup> Volume, km <sup>3</sup>	Площадь, км <sup>2</sup> Area, km <sup>2</sup>	Сток, км <sup>3</sup> Outflow, km <sup>3</sup>
Телецкое Teletskoe	174	40	223	15
Онежское Onego	30	295	9720	18,88
Ладожское Ladoga	51	910	17700	77,69
Имандра Imandra	16	11,2	876	5,17
Топозеро Topozero	15,9	15,6	986	1,201
Нотозеро Notozero	15	11,5	745	7,61
Чудское Chudskoe	7,5	21,8	2613	12,58
Селигер Seliger	5,8	1,22	260	0,63
Крошноезеро Kroshnozero	5,7	0,0505	8,9	0,0574
Белое Beloe (White)	4,1	5,2	1284	5,42

Таблица 3. Период водообмена ( $\tau$ ), удерживающая способность озер ( $R$ ) и константы скорости трансформации фосфора ( $k$ )

Table 3. Period of water exchange ( $\tau$ ), retention capacity of the lakes ( $R$ ) and rate constants of phosphorus transformation ( $k$ )

Озеро Lake	$\tau$ , год $\tau$ , year	$R$ $R$	$k$ , год <sup>-1</sup> $k$ , year <sup>-1</sup>
Телецкое Teletskoe	2,67	0,46	0,25
Онежское Onego	15,6	0,73	0,15
Ладожское Ladoga	11,7	0,68	0,15
Имандра Imandra	2,17	0,44	0,28
Топозеро Topozero	13	0,70	0,15
Нотозеро Notozero	1,51	0,41	0,34
Чудское Chudskoe	1,73	0,42	0,32
Селигер Seliger	1,94	0,43	0,30
Крошнозеро Kroshnozero	0,88	0,38	0,63
Белое Beloe (White)	0,96	0,38	0,46

По данным, приведенным в табл. 2, и формулам (2), (3) и (4) рассчитаны период водообмена ( $\tau$ ), удерживающая способность фосфора в водном объекте ( $R$ ) и константы скорости трансформации фосфора ( $k$ ) (табл. 3).

### Результаты и обсуждение

В обобщенном виде результаты расчетов допустимых фосфорных нагрузок на рассмотренные озера приведены в табл. 4.

Таблица 4. Допустимые фосфорные нагрузки на озера, т/год

Table 4. Permissible phosphorus loads on the lakes, tons/year

Озеро Lake	Метод Фолленвайдера Follenweider's method	Метод Фолленвайдера и Диллона Follenweider and Dillon's method	Метод Лозовика Lozovik's method
Телецкое Teletskoe	123	383	128
Онежское Onego	1870	924	736
Ладожское Ladoga	4682	3408	1993
Имандра Imandra	116	160	142
Топозеро Topozero	130	56	55
Нотозеро Notozero	95	165	159
Чудское Chudskoe	219	263	327
Селигер Seliger	18,7	18,6	25,2
Крошнозеро Kroshnozero	0,63	1,1	2,0
Белое Beloe (White)	75	109	196

Таблица 5. Количественные соотношения между допустимыми фосфорными нагрузками на озера и площадями их водосборов

Table 5. Quantitative ratios between the permissible phosphorus loads on the lakes and areas of their catchments

Метод Method	Модель Model	Статистические характеристики Statistical characteristics			
		n	r	$\sigma_{y(x)}$	F <sub>p</sub>
Фолленвайдера Follenweider's	$\ln L_{\text{доп}} = -5,17 + 1,07 \ln F$	10	0,926	0,97	48,1
Фолленвайдера и Диллона Follenweider and Dillon's	$\ln L_{\text{доп}} = -4,29 + 0,99 \ln F$	10	0,939	0,80	59,8
Лозовика Lozovik's	$\ln L_{\text{доп}} = -3,09 + 0,86 \ln F$	10	0,943	0,67	64,4

Примечание. n – количество озер, r – коэффициент корреляции,  $\sigma_{y(x)}$  – стандартная ошибка, F<sub>p</sub> – расчетное значение критерия Фишера.

Note. n – number of lakes, r – correlation coefficient,  $\sigma_{y(x)}$  – standard error, F<sub>p</sub> – calculated value of Fisher's criterion.

Учитывая, что озеро и его водосбор – единая природная система [Драбкова, Сорокин, 1979], представлялось целесообразным установить количественные соотношения между допустимыми фосфорными нагрузками на рассматриваемые озера ( $L_{\text{доп}}$ ) и площадями их водосборов (F). Результаты проведенного анализа приведены в табл. 5.

Согласно шкале Чеддока [Макарова, Трофимец, 2002], приведенные в табл. 5 значения коэффициентов корреляции свидетельствуют о весьма тесной связи между переменными ( $\ln L_{\text{доп}}$  и  $\ln F$ ). Наиболее высокие значения коэффициента корреляции и критерия Фишера и наименьшее значение стандартной ошибки установлено при применении метода Лозовика.

## Выводы

1. Достоверность и точность определения величины допустимой фосфорной нагрузки на водный объект, позволяющей ему оставаться в олиготрофном статусе, зависит от метода расчета.
2. Установлены статистически значимые соотношения между допустимыми фосфорными нагрузками на озера и площадями их водосборов.
3. Отличительная особенность метода расчета допустимых фосфорных нагрузок на озера, разработанного П. А. Лозовиком, по сравнению с традиционно используемыми методами Фолленвайдера и Фолленвайдера и Диллона заключается в том, что он учитывает не только морфологические и гидрологические характеристики водного объекта, но и его ассимиляционную способность в отношении соединений фосфора.

Работа выполнена в РГПУ им. А. И. Герцена в рамках государственного задания при фи-

нансовой поддержке Минпросвещения России (проект № FSZN-2020-0016).

## Литература

- Гусаков Б. Л. Критическая концентрация фосфора в озерном притоке и ее связь с трофическим уровнем водоема / Ред. Н. А. Петрова и Б. Л. Гутельмахер. Л.: Наука, 1987. С. 7–17.
- Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор – единая природная система. Л.: Наука, 1979. 195 с.
- Лозовик П. А. Гидрохимические критерии состояния поверхностных вод гумидной зоны и их устойчивости к антропогенному воздействию: Автореф. дис. ... докт. хим. наук. 2006. 56 с.
- Лозовик П. А., Рыжаков А. В., Сабылина А. В. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах // Труды КарНЦ РАН. 2011. № 4. С. 21–28.
- Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика, 2002. 368 с.
- Науменко М. А. Эвтрофирование озер и водохранилищ. Учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2007. 100 с.
- Одум Ю. Экология. Т. 2. М.: Мир, 1986. 376 с.
- Россолимо Л. Л. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука, 1977. 144 с.
- Фруммин Г. Т., Гильдеева И. М. Эвтрофирование водоемов – глобальная экологическая проблема // Экологическая химия. 2013. Т. 22, № 4. С. 191–197.
- Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.
- Vollenweider R. A., Dillon P. I. The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research // Nat. Res. Counc. Canada NRO Assoc. Comm. Sci criteria. Environmental Quality NRCC. 1974. No. 13690. 42 p.
- Vollenweider R. A. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication // Tech. Rep. Organiz. Econom. Cooper. Devel. 1968. Vol. 27. 159 p.

Поступила в редакцию 25.02.2021

## References

- Drabkova V. G., Sorokin I. N.* Ozero i ego vodosbor – edinaya prirodnyaya sistema [A lake and its catchment is a united natural system]. Leningrad: Nauka, 1979. 195 p.
- Frumin G. T., Gil'deeva I. M.* Evtrofirovaniye vo-doemov – global'naya ekologicheskaya problema [Eutrophication of water bodies – a global ecological problem]. *Ekol. khimiya* [Ecol. Chemistry]. 2013. Vol. 22, no. 4. P. 191–197.
- Gusakov B. L.* Kriticheskaya kontsentratsiya fosfora v ozernom pritoke i ee svyaz' s troficheskim urovnem vo-doema [Critical concentration of phosphorus in the lake tributary and its relationship with the trophic level of the reservoir]. Eds. N. A. Petrov, B. L. Gutelmakher. Leningrad: Nauka, 1987. P. 7–17.
- Khenderson-Sellers B., Marklend Kh. R.* Umirayushchie ozera. Prichiny i kontrol' antropogennogo evtrofirovaniya [Dying lakes. Causes and control of man-induced eutrophication]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 280 p.
- Lozovik P. A.* Gidrokhimicheskie kriterii sostoyaniya poverkhnostnykh vod gumidnoi zony i ikh ustoichivosti k antropogennomu vozdeistviyu [Hydrochemical criteria of the state of surface water in humid zone and its tolerance to anthropogenic impact]: Summary of DSc (Dr. of Chem.) thesis. 2006. 56 p.
- Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Sabylina A. V.* Protsessy transformatsii, krugovorota i obrazovaniya veshchestv

v prirodnykh vodakh [Processes of matter transformation, cycles and formation in natural waters]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2011. No. 4. P. 21–28.

*Makarova N. V., Trofimets V. Ya.* Statistika v Excel [Statistics in Excel]. Moscow: Finansy i statistika, 2002. 368 p.

*Naumenko M. A.* Evtrofirovaniye ozer i vodokhranilishch. Uchebnoe posobie [Eutrophication of lakes and reservoirs. A study guide]. St. Petersburg: RGGMU, 2007. 100 p.

*Odum Yu.* Ekologiya [Ecology]. Vol. 2. Moscow: Mir, 1986. 376 p.

*Rossolimo L. L.* Izmeneniye limnicheskikh ekosistem pod vozdeistviem antropogennogo faktora [Changes in limnic ecosystems under the influence of anthropogenic factors]. Moscow: Nauka, 1977. 144 p.

*Vollenweider R. A., Dillon P. J.* The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research. *Nat. Res. Counc. Canada NRO Assoc. Comm. Sci. criteria*. Environmental Quality NRCC. 1974. No. 13690. 42 p.

*Vollenweider R. A.* Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. *Tech. Rep. Organiz. Econom. Cooper. Devel.* 1968. Vol. 27. 159 p.

Received February 25, 2021

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

### **Фрумин Григорий Тевелевич**

ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаб. факультета географии, д. х. н., проф.  
Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена  
наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, Россия, 191186  
эл. почта: gfrumin@mail.ru  
тел.: +79111274098

### **Кулинкович Алексей Викторович**

доцент кафедры экологической безопасности телекоммуникаций, к. х. н., доцент  
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. профессора М. А. Бонч-Бруевича  
пр. Большевиков, 22, корп. 1, Санкт-Петербург, Россия, 193232  
эл. почта: geochem@mail.ru  
тел.: 89111608337

### **Горельшев Алексей Юрьевич**

преподаватель кафедры экологической безопасности телекоммуникаций  
Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. профессора М. А. Бонч-Бруевича  
пр. Большевиков, 22, корп. 1, Санкт-Петербург, Россия, 193232  
эл. почта: gau7001@mail.ru  
тел.: 89110297031

## CONTRIBUTORS:

### **Frumin, Grigory**

Herzen State Pedagogical University of Russia  
48 Nab. R. Moiki, 191186 St. Petersburg, Russia  
e-mail: gfrumin@mail.ru  
tel.: +79111274098

### **Kulinkovich, Alexey**

The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications  
22 Bolshevikov Ave., bldg. 1, 193232 St. Petersburg, Russia  
e-mail: geochem@mail.ru  
tel.: +79111608337

### **Gorelyshev, Alexey**

The Bonch-Bruevich St. Petersburg State University of Telecommunications  
22 Bolshevikov Ave., bldg. 1, 193232 St. Petersburg, Russia  
e-mail: gau7001@mail.ru  
tel.: +79110297031