

УДК 504.4.062.2

DOI 10.52575/2712-7443-2021-45-2-227-235

Допустимые фосфорные нагрузки на озера Карелии

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

¹Российский государственный педагогический университет им. А.И. Герцена,
Россия, 191186, г. Санкт-Петербург, наб. р. Мойки, 48

²Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. профессора М.А. Бонч-Бруевича,

Россия, 193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков д. 22, корп. 1

E-mail: gfrumin@mail.ru, geochem@mail.ru

Аннотация. Среди современных проблем гидроэкологии центральное место занимает проблема эвтрофирования. В условиях антропогенного воздействия степень эвтрофирования водоема определяется в основном поступлением в водоем биогенных веществ, в первую очередь соединений фосфора. Для водоемов умеренной зоны решающая роль фосфора, определяющего скорость развития планктонных водорослей, может считаться доказанной. До настоящего времени отсутствуют исследования, посвященные сравнительной оценке различных методов расчета допустимых фосфорных нагрузок на пресноводные водоемы. В связи с этим авторы провели исследование на основе математических моделей, связывающих допустимые фосфорные нагрузки на озера Карелии с их морфометрическими, гидрологическими и ассимиляционными характеристиками. В результате исследования было установлено статистически значимое соотношение между допустимыми фосфорными нагрузками на озера Карелии и площадями их водосборов. Полученные результаты позволяют природоохранным организациям принимать обоснованные решения о необходимом снижении антропогенной нагрузки на озера Карелии.

Ключевые слова: пресноводные озера, эвтрофирование, математические модели, ассимиляционная способность, площадь водосбора.

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

Для цитирования: Фрумин Г.Т., Куликович А.В., Горелышев А.Ю. 2021. Допустимые фосфорные нагрузки на озера Карелии. Региональные геосистемы, 45 (2): 227–235. DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-2-227-235

Permissible phosphorus loads on the lakes of Karelia

¹Grigory T. Frumin, ²Alexey V. Kulinkovich, ²Alexey Yu. Gorelyshev

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia,
48 nab. R. Moiki, St. Petersburg, 191186, Russia

² The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
22 Bolshevikov Ave., building 1, St. Petersburg, 193232, Russia

E-mail: gfrumin@mail.ru, geochem@mail.ru

Abstract. Among the modern problems of hydroecology, the problem of eutrophication occupies a central place. Under conditions of anthropogenic impact, the degree of eutrophication of a reservoir is determined mainly by the intake of nutrients into the reservoir, primarily phosphorus compounds. For water bodies of the temperate zone, the decisive role of phosphorus, which determines the rate of development of planktonic algae, can be considered proven. Until now, there are no studies devoted to the comparative assessment of various methods for calculating the permissible phosphorus loads on freshwater bodies. In this regard, the authors carried out a study based on mathematical models linking

the permissible phosphorus loads on the lakes of Karelia with their morphometric, hydrological and assimilation characteristics. As a result of the study, a statistically significant relationship was established between the permissible phosphorus loads on the lakes of Karelia and the areas of their catchments. The results obtained allow environmental organizations to make informed decisions about the necessary reduction of anthropogenic load on the lakes of Karelia.

Key words: freshwater lakes, eutrophication, mathematical models, assimilation capacity, catchment area.

Acknowledgments: The research was supported by the Ministry of Education of the Russian Federation as part of a state task (project No. FSZN-2020-0016).

For citation: Frumin G.T., Kulinkovich A.V., Gorelyshev A.Yu. 2021. Permissible phosphorus loads on the lakes of Karelia. Regional geosystems, 45 (2): 227–235 (in Russian). DOI: 10.52575/2712-7443-2021-45-2-227-235

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, Марклэнд, 1990; Хрисанов, Осипов, 1993; Науменко, 2007; Семенченко, Разлуцкий, 2011; Фрумин, Гильдева, 2013; Frumin, Gildeeva, 2014; Фрумин, 2019; Неверова-Дзюпак, Цветкова, 2020].

Особая актуальность проблемы эвтрофирования обусловлена наличием на территории России большого количества трансграничных (международных) водных объектов. РФ граничит с 14 государствами Европы и Азии [Тимофеева, Фрумин, 2017].

Согласно ГОСТ 17.1.1.01-77, «эвтрофированием называется повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления биогенных элементов под действием антропогенных или естественных факторов». При антропогенном воздействии для водоёмов умеренной зоны степень эвтрофирования в основном определяется соединениями фосфора [Россолимо, 1977].

Количественная оценка соотношения между биогенной нагрузкой и трофическим статусом водоёма впервые была разработана Фолленвайдером [Гусаков, 1987], согласно которому, «допустимая нагрузка» – это нагрузка, ниже которой водоём остается в олиготрофном статусе, «критическая нагрузка» – это нагрузка, превышение которой сопровождается переходом водоёма из мезотрофного статуса в эвтрофный.

Цель исследования – анализ методов расчета допустимых фосфорных нагрузок на озера Карелии.

Объекты и методы исследования

На территории Карелии насчитывается 61,1 тыс. озёр общей площадью около 18 тыс. км². В пределах Республики Карелия расположено около 40 % акватории Ладожского и 80 % – Онежского озёр. По данным, приведенном в справочнике [Озера Карелии. Справочник, 2013], было установлено распределение 186 озёр по трофическому статусу (рис. 1).

Из 186 озер (рис. 1) 135 характеризуются мезотрофным, эвтрофным и гипертрофным трофическим статусом и только для 51 озера зафиксирован ультраолиготрофный или олиготрофный трофический статус.

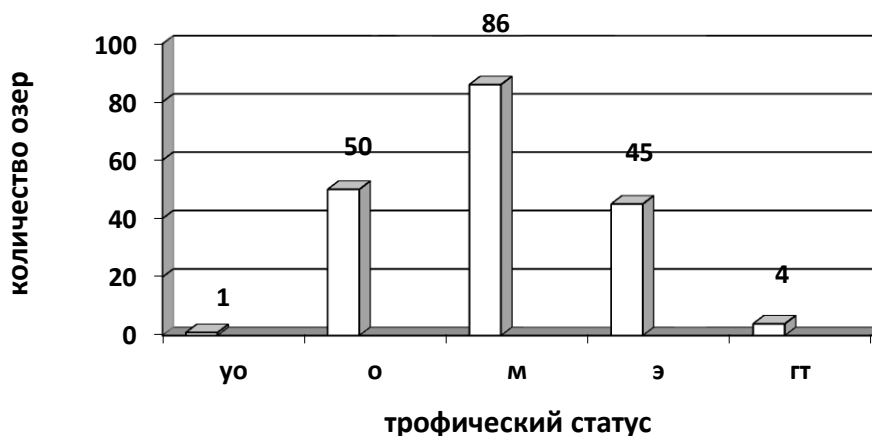


Рис. 1. Распределение озер Карелии по трофическому статусу: уо – ультраолиготрофный, о – олиготрофный, м – мезотрофный, э – эвтрофный, гт – гипертрофный
Fig. 1. Distribution of lakes in Karelia by trophic status: уо – ultraoligotrophic, о – oligotrophic, м – mesotrophic, э – eutrophic, гт – hypertrophic

Наличие количественного соотношения между величиной экспорта фосфора в водоём и его реакцией рассматривается в так называемой «нагрузочной концепции».

Величина допустимой фосфорной нагрузки ($L_{\text{доп}}$, гР/м²·год), позволяющей водоёму оставаться в олиготрофном статусе, было предложено Фолленвайдером [Vollenweider, 1968] в виде формулы

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

где H – средняя глубина водоема, м.

В работе [Dillon, Vollenweider, 1974; Кривопускова, Цветкова, 2017] приведена формула (2) для расчёта критической фосфорной нагрузки:

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

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

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

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

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 мгР/л [Гусаков, 1987]. В этом случае выражение для допустимой фосфорной нагрузки приводится к следующему виду:

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

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 способность водного объекта следует принимать истинную скорость трансформации вещества в воде [Лозовик и др. 2011; Лозовик, Фрумин, 2018]. Допустимая фосфорная нагрузка рассчитывается по формуле

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

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

Соотношение ассимиляции и внешней нагрузки на водный объект рассчитывается по уравнению

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

где k – константа скорости трансформации, год^{-1} , R – удерживающая способность в водном объекте.

Удерживающая способность фосфора в водном объекте рассчитывается по формуле

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

Константу скорости трансформации можно рассчитать, используя формулу

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

Расчет ассимиляционной способности водного объекта

$$As = kC_{\text{оз}}V_{\text{сток}}(\tau + 1), \quad (9)$$

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

Для расчета природного содержания фосфора в водоеме авторами данной статьи использована модель Фолленвайдера (1). К примеру, средняя глубина озера Топозеро $H = 15,9$ м, площадь зеркала $S = 986$ км^2 , объем $V = 15,6$ км^3 . Допустимая фосфорная нагрузка $L_{\text{доп}} = 0,025 \times H^{0,6} = 0,025 \times 5,26 \times 986 = 129,6$ т и природное (фоновое) содержание фосфора $C_{\text{прир}} = 129,6 / 15,6 = 8,3$ мкг/л .

В справочнике [Озёра Карелии. Справочник, 2013] приведены морфометрические и гидрологические данные 225 озёр Карелии. Для иллюстрации методов расчёта были использованы данные для 10 наиболее крупных озёр (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Морфометрические и гидрологические характеристики озёр
Morphometric and hydrological characteristics of lakes

Озеро	Средняя глубина, м	Объем, км^3	Площадь, км^2	Сток, $\text{км}^3/\text{год}$
Ладожское	51	910	17700	77,1
Онежское	30	295	9720	18,9
Сегозеро	29	23,4	815	2,35
Пяозеро	17,7	16,7	943	5,01
Топозеро	15,9	15,6	986	1,2
Выгозеро	5,8	7,2	1251	5,66
Среднее Куйто	10,4	2,67	257	3,51
Верхнее Куйто	8,7	2,09	240	2,67
Янисъярви	10,2	2,04	200	1,45
Пюхяярви	7,9	1,95	247	0,47

По данным, приведенным в табл. 1, и согласно формулам (3), (7) и (8), были рассчитаны период водообмена (τ), удерживающая способность фосфора в водном объекте (R) и константы скорости трансформации фосфора (k) (табл. 2).

Таблица 2
Table 2

Период водообмена (τ), удерживающая способность озёр (R)
и константы скорости трансформации фосфора (k)
Period of water exchange (τ), retention capacity of lakes (R) and rate constants
of phosphorus transformation (k)

Озеро	τ , год	R	k , год ⁻¹
Ладожское	11,8	0,681	0,154
Онежское	15,6	0,727	0,146
Сегозеро	9,95	0,653	0,16
Пяозеро	3,33	0,488	0,23
Топозеро	13	0,698	0,152
Выгозеро	1,27	0,409	0,385
Среднее Куйто	0,76	0,373	0,546
Верхнее Куйто	0,78	0,375	0,536
Янисъярви	1,4	0,407	0,363
Пюхьярви	4,07	0,515	0,212

Результаты и их обсуждение

В обобщенном виде результаты расчётов допустимых фосфорных нагрузок на рассмотренные озёра приведены в табл. 3.

Таблица 3
Table 3

Допустимые фосфорные нагрузки на озёра, т/год
Permissible phosphorus loads on lakes, t/year

Озеро	Метод Фолленвайдера	Метод Фолленвайдера и Диллона	Метод Лозовика
Ладожское	4682	3393	2032
Онежское	1870	925	733
Сегозеро	154	19	72
Пяозеро	132	142	117
Топозеро	130	56	54
Выгозеро	90	122	180
Среднее Куйто	26	66	88
Верхнее Куйто	22	50	72
Янисъярви	20	32	37
Пюхьярви	21	14	16

Учитывая, что озеро и его водосбор – единая природная система [Драбкова, Сорокин, 1979; Кондратьев, 2007; Кондратьев и др., 2010; Кондратьев, Шмакова, 2019], представлялось целесообразным установить количественные соотношения между допустимыми

ми фосфорными нагрузками на 225 озер Карелии ($L_{\text{доп}}$) и площадями их водосборов (F). Результаты проведенного анализа приведены в табл. 4 и на рис. 2.

Таблица 4
Table 4

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

Метод	Модель	Статистические характеристики			
		n	r	$\sigma_{Y(X)}$	F_p
Фолленвайдера	$\ln L_{\text{доп}} = -4,043 + 0,681 \ln F$	225	0,73	1,43	247
Фолленвайдера и Диллона	$\ln L_{\text{доп}} = -7,606 + 0,79 \ln F$	225	0,88	1,30	754
Лозовика	$\ln L_{\text{доп}} = -4,188 + 1,049 \ln F$	225	0,92	1,01	1184

Примечание: n – количество озер, r – коэффициент корреляции, $\sigma_{Y(X)}$ – стандартная ошибка, F_p – расчетное значение критерия Фишера.

Значения коэффициентов корреляции, приведенные в табл. 4, согласно шкале Чеддока [Макарова, Трофимец, 2002], свидетельствуют о «весьма высокой» тесноте связи между переменными ($\ln L_{\text{доп}}$ и $\ln F$). Наиболее высокие значения коэффициента корреляции и критерия Фишера и наименьшее значение стандартной ошибки установлены при применении метода Лозовика.

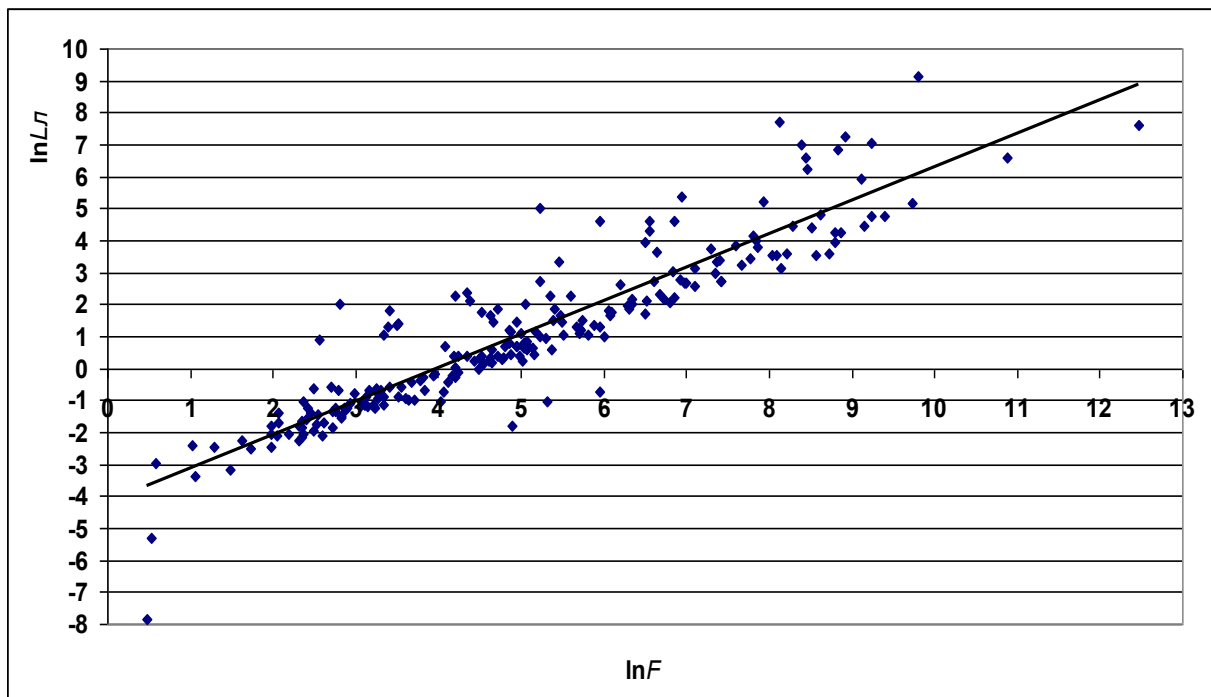


Рис. 2. Соотношение между натуральными логарифмами допустимых фосфорных нагрузок на озера Карелии и натуральными логарифмами площадей их водосборов

Fig. 2. Relationship between the natural logarithms of the permissible phosphorus loads on the lakes of Karelia and the natural logarithms of the areas of their catchments

Выводы

1. Достоверность определения величины допустимой фосфорной нагрузки на водные объекты (пресноводные озера), позволяющая им оставаться в олиготрофном статусе, зависит от метода расчета, базирующегося на математической модели.

2. 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.

3. Отличительная особенность метода расчета допустимых фосфорных нагрузок на озёра Карелии, разработанного П.А. Лозовиком, по сравнению с традиционно используемыми методами Фолленвайдера и Фолленвайдера и Диллона, заключается в том, что он учитывает не только морфометрические и гидрологические характеристики водного объекта, но и его ассимиляционную (самоочистительную) способность в отношении соединений фосфора.

4. Установлено статистически значимое соотношение между допустимыми фосфорными нагрузками на двести двадцать пять озёр Карелии и площадями их водосборов, что позволяет природоохранным организациям принимать обоснованные решения о необходимом снижении антропогенной нагрузки на эти озера.

Список источников

1. Озёра Карелии. Справочник. 2013. Под ред. Н.Н. Филатова, В.И. Кухарева. Петрозаводск, Карельский научный центр РАН, 464 с.
2. Макарова Н.В., Трофимец В.Я. 2002. Статистика в Excel. М., Финансы и статистика, 368 с.
3. Науменко М.А. 2007. Эвтрофирование озёр и водохранилищ. СПб., РГГМУ, 100 с.

Список литературы

1. Гусаков Б.Л. 1987. Критическая концентрация фосфора в озерном притоке и ее связь с трофическим уровнем водоема. В кн.: Элементы круговорота фосфора в водоемах. Ред. Н.А. Петрова, Б.Л. Гутельмахер. Л., Наука, 7–17.
2. Дракцова В.Г., Сорокин И.Н. 1979. Озеро и его водосбор – единая природная система. Л., Наука, 195 с.
3. Кондратьев С.А. 2007. Формирование внешней нагрузки на водоёмы: проблемы моделирования. СПб., Наука, 253 с.
4. Кондратьев С.А., Голосов С.Д., Зверев И.С., Рябченко В.А., Дворников А.Ю. 2010. Моделирование абиотических процессов в системе водосбор – водоём (на примере Чудско-Псковского озера). СПб., Нестор-История, 115 с.
5. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. 2019. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоём. СПб., Нестор-История, 246 с.
6. Кривопускова Е.В., Цветкова Н.Н. 2017. Предварительная оценка критической фосфорной нагрузки на озеро Виштынецкое (Калининградская область). Известия КГТУ, 45: 83–92.
7. Лозовик П.А., Рыжаков А.В., Сабылина А.В. 2011. Процессы трансформации, круговорота и образования веществ в природных водах. Труды Карельского научного центра Российской академии наук, 4: 21–28.
8. Лозовик П.А., Фрумин Г.Т. 2018. Современное состояние и допустимые биогенные нагрузки на Псковско-Чудское озеро. Труды Карельского научного центра Российской академии наук, 3: 3–10. DOI: 10.17076/lim626.
9. Неверова-Дзюпак Е., Цветкова Л.Т. 2020. Оценка трофического состояния поверхностных вод: монография. СПб., СПбГАСУ, 176 с.



10. Россолимо Л.Л. 1977. Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М., Наука, 144 с.
11. Семенченко В.П., Разлуцкий В.И. 2011. Экологическое качество поверхностных вод. Минск, Беларус. навука, 329 с.
12. Тимофеева Л.А., Фрумин Г.Т. 2017. Трансграничные водные объекты. СПб., СпецЛит, 159 с.
13. Фрумин Г.Т., Гильдеева И.М. 2013. Эвтрофирование водоемов – глобальная экологическая проблема. Экологическая химия, 22 (4): 191–197.
14. Хендерсон-Селлерс Б., Марклэнд Х.Р. 1990. Умирающие озёра. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л., Гидрометеиздат, 280 с.
15. Хрисанов Н.И., Осипов Г.К. 1993. Управление эвтрофированием водоемов. СПб., Гидрометеиздат, 278 с.
16. Frumin G.T., Gildeeva I.M. 2014. Eutrophication of Water Bodies – A Global Environment Problem. Russian Journal of General Chemistry, 84 (13): 2483–2488. DOI: 10.1134/S1070363214130015
17. Dillon P.I., Vollenweider R.A. 1974. The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research. Canada, Associate Committee on Scientific Criteria for Environmental Quality National Research Council, 42 p.
18. Vollenweider R.A. 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. Paris, Technical Reports Organisation for economic co-operation and development, 159 p.

References

1. Gusakov B.L. 1987. Kriticheskaya kontsentratsiya fosfora v ozernom pritoke i yeye svyaz' s troficheskim urovnem vodoyema [Critical concentration of phosphorus in the lake tributary and its relationship with the trophic level of the reservoir]. In: Elementy krugovorota fosfora v vodoyemakh [Elements of the phosphorus cycle in water bodies]. Ed. N.A. Petrova, B.L. Gutel'makher. Leningrad, Publ. Nauka, 7–17.
2. Drabkova V.G., Sorokin I.N. 1979. Ozero i yego vodosbor — yedinaya prirodnaya sistema [The lake and its catchment - a single natural system]. Leningrad, Publ. Nauka, 195 p.
3. Kondrat'yev S.A. 2007. Formirovaniye vneshney nagruzki na vodoyemy: problemy modelirovaniya [Formation of external load on water bodies: modeling problems]. St. Petersburg, Publ. Nauka, 253 p.
4. Kondrat'yev S.A., Golosov S.D., Zverev I.S., Ryabchenko V.A., Dvornikov A.YU. 2010. Modelirovaniye abioticheskikh protsessov v sisteme vodosbor – vodoyem (na primere Chudsko-Pskovskogo ozera) [Modeling abiotic processes in the catchment - reservoir system (on the example of Lake Peipsi-Pskov)]. St. Petersburg, Publ. Nestor-Istoriya, 115 p.
5. Kondrat'yev S.A., Shmakova M.V. 2019. Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v sisteme vodosbor – vodotok – vodoyem [Mathematical modeling of mass transfer in the catchment - watercourse - water body system]. St. Petersburg, Publ. Nestor-Istoriya, 246 p.
6. Krivopuskova E.V., Tsvetkova N.N. 2017. Preliminary Estimate of Critical Phosphorus Load in Lake Vishtynetskoe (the Kaliningrad Region). KSTU NEWS, 45: 83–92 (in Russian).
7. Lozovik P.A., Ryzhakov A.V., Sabylina A.V. 2011. Processes of Matter Transformation, Cycles and Formation in Natural Waters. Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 4: 21–28 (in Russian).
8. Lozovik P.A., Frumin G.T. 2018. Present-Day State and Permissible Nutrient Loadings on Lake Peipus. Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 3: 3–10. DOI: 10.17076/lim626 (in Russian).
9. Neverova-Dziopak Ye., Tsvetkova L.T. 2020. Otsenka troficheskogo sostoyaniya poverkhnostnykh vod: monografiya [Assessment of the trophic state of surface waters: monograph]. St. Petersburg, Publ. SPbGASU, 176 p.
10. Rossolimo L.L. 1977. Izmeneniye limnicheskikh ekosistem pod vozdeystviyem antropogennogo faktora [Changes in limnic ecosystems under the influence of anthropogenic factors]. Moscow, Publ. Nauka, 144 p.

11. Semenchenko V.P., Razlutskiy V.I. 2011. Ekologicheskoye kachestvo poverkhnostnykh vod [Environmental quality of surface waters]. Minsk, Publ. Belarus. navuka, 329 p.
12. Timofeyeva L.A., Frumin G.T. 2017. Transgranichnyye vodnyye ob'yekty [Transboundary water bodies]. St. Petersburg, Publ. SpetsLit, 159 p.
13. Frumin G.T., Gil'deyeva I.M. 2013. Evtrofirovaniye vodoyemov – global'naya ekologicheskaya problema [Eutrophication of water bodies – a global environmental problem]. Ekologicheskaya khimiya, 22 (4): 191–197.
14. Khenderson-Sellers B., Marklend K.H.R. 1990. Umirayushchiye ozera. Prichiny i kontrol' antropogennogo evtrofirovaniya [Dying lakes. Causes and control of anthropogenic eutrophication]. Leningrad, Publ. Gidrometeoizdat, 280 p.
15. Khrisanov N.I., Osipov G.K. 1993. Upravleniye evtrofirovaniyem vodoyemov [Management of eutrophication of water bodies]. St. Petersburg, Publ. Gidrometeoizdat, 278 p.
16. Frumin G.T., Gildeeva I.M. 2014. Eutrophication of Water Bodies – A Global Environment Problem. Russian Journal of General Chemistry, 84 (13): 2483–2488. DOI: 10.1134/S1070363214130015
17. Dillon P.I., Vollenweider R.A. 1974. The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research. Canada, Associate Committee on Scientific Criteria for Environmental Quality National Research Council, 42 p.
18. Vollenweider R.A. 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing water with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. Paris, Technical Reports Organisation for economic co-operation and development, 159 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фрумин Григорий Тевелевич, профессор, доктор химических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории факультета географии Российского государственного педагогического университета им. А.И. Герцена, г. Санкт-Петербург, Россия

Куликович Алексей Викторович, кандидат химических наук, доцент кафедры экологической безопасности телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. профессора М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия

Горелышев Алексей Юрьевич, старший преподаватель кафедры экологической безопасности телекоммуникаций Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. профессора М.А. Бонч-Бруевича, г. Санкт-Петербург, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Grigory T. Frumin, Professor, Doctor of Chemistry, Leading Researcher of the Research Laboratory of the Faculty of Geography of the Russian State Pedagogical University named after A.I. Herzen, St. Petersburg, Russia

Alexey V. Kulinkovich, Candidate of chemical sciences, Associate Professor of the Department of Environmental Safety of Telecommunications of the St. Petersburg State University of Telecommunications named after Professor M.A. Bonch-Bruevich, St. Petersburg, Russia

Alexey Yu. Gorelyshev, Senior Lecturer of the Department of Environmental Safety of Telecommunications of the St. Petersburg State University of Telecommunications named after Professor M.A. Bonch-Bruevich, St. Petersburg, Russia