

УДК 504

ДОПУСТИМЫЕ БИОГЕННЫЕ НАГРУЗКИ НА МЕЖДУНАРОДНЫЕ ОЗЕРА

Г. Т. Фрумин¹, А. Ю. Горелышев², А. В. Кулинкович²

¹ *Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, Санкт-Петербург, Россия*

² *Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Россия*

Для 17 международных (трансграничных) водоемов рассчитаны допустимые фосфорные и азотные нагрузки, позволяющие им оставаться в олиготрофном статусе. Для расчетов использованы методы Фолленвайдера, Фолленвайдера и Диллона и метод Лозовика. Исследование проводилось на основе математических моделей, связывающих допустимые биогенные нагрузки на водные объекты с их морфометрическими, гидрологическими и ассимиляционными характеристиками. Установлено статистически значимое соотношение между допустимыми биогенными нагрузками на шестнадцать трансграничных озер и одно трансграничное водохранилище и площадями их водосборов. Выявленные количественные соотношения позволяют природоохранным организациям принимать обоснованные решения о необходимом снижении антропогенной нагрузки на исследованные водоемы.

Ключевые слова: трансграничные водоемы; эвтрофирование; математические модели; ассимиляционная способность; площадь водосбора.

G. T. Frumin, A. Yu. Gorelyshev, A. V. Kulinkovich. PERMISSIBLE NUTRIENT LOADINGS ON INTERNATIONAL LAKES

Permissible phosphorus and nitrogen loadings were calculated for 17 international (transboundary) water bodies, which allow them to remain in an oligotrophic state. The calculations were performed by the methods suggested by Vollenweider, Vollenweider and Dillon, and Lozovik. The study was based on mathematical models linking the permissible nutrient loadings on water bodies with their morphometric, hydrological, and assimilation characteristics. A statistically significant relationship was established between the permissible nutrient loadings on sixteen transboundary lakes and one transboundary storage reservoir and their catchment areas. The revealed quantitative ratios enable environment agencies to make informed decisions about the need for reducing human pressure on the investigated water bodies.

Keywords: transboundary water bodies; eutrophication; mathematical models; assimilation capacity; catchment area.

Введение

В последние годы биогенное загрязнение водоемов (водотоков, озер и водохранилищ) и их эвтрофирование становится одной из наиболее актуальных проблем охраны водных ресурсов. Эта проблема характерна для многих стран мира, в том числе и для России. Изучению различных аспектов эвтрофирования вод уделяется значительное внимание. Создана Международная комиссия по эвтрофированию водоемов, производится их инвентаризация по уровню трофности, проводятся обширные эксперименты и наблюдения. Выполнено обследование большинства озер и водохранилищ США, Канады и Западной Европы [Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990; Науменко, 2007; Фрумин, 2013].

В эвтрофировании водоемов принимают участие два главных биогенных элемента – азот и фосфор. Если $N_{\text{мин}} : P_{\text{мин}}$ (отношение содержания минерального азота к содержанию минерального фосфора) меньше 10, то первичная продукция фитопланктона лимитируется азотом, при $N_{\text{мин}} : P_{\text{мин}} > 17$ – фосфором, при $N_{\text{мин}} : P_{\text{мин}} = 10-17$ – азотом и фосфором одновременно [Дмитриев, 1995].

Особую значимость рассматриваемой проблеме придает наличие на территории России и сопредельных государств международных (трансграничных) водных объектов (Чудско-Псковский озерный комплекс, река Нарва, Финский и Куршский заливы Балтийского моря и др.) [Тимофеева, Фрумин, 2017].

Отсутствие механизма, регулирующего взаимную ответственность государств за систематическое загрязнение трансграничных вод сверх экологически допустимых уровней, является весьма серьезной и нерешенной проблемой международных водных отношений и не способствует активизации работ по оздоровлению трансграничных водных объектов.

В г. Хельсинки 17 марта 1992 года была подписана Конвенция по охране и использованию трансграничных водотоков и международных озер, вступившая в силу 6 октября 1996 г. Со времени подписания Конвенции прошло уже почти тридцать лет, однако есть еще вопросы, которые окончательно не решены путем переговоров и нуждаются в дальнейшем развитии. Защита ландшафтов, экосистемный подход, водораспределение, защита от наводнений и эвтрофирования представляют собой лишь некоторые примеры подобных вопросов.

Биогенная нагрузка, превысившая некоторый критический уровень для данного водое-

ма, приводит к значительному снижению его биологической продуктивности и ухудшению качества воды [Даценко, 2007].

Цель проведенного исследования – анализ методов расчета допустимых биогенных нагрузок на трансграничные озера.

Материалы и методы

Первичные морфометрические и гидрологические данные трансграничных озер, расположенных в Европе, Азии, Северной и Южной Америке, были заимствованы из World Lake Database (International Lake Environment Committee Foundation (ILEC) (табл. 1).

Для расчетов допустимых фосфорных нагрузок на трансграничные водные объекты использованы методы, разработанные Фолленвайдером, Фолленвайдером и Диллоном, а также Лозовиком. Соответствующие этим методам математические модели приведены в работах [Лозовик и др., 2011; Лозовик, Фрумин, 2018; Фрумин и др., 2021а]. Для оптимизации расчетов разработана программа для ЭВМ «Программа расчета допустимых фосфорных нагрузок на пресноводные озера» [Фрумин и др., 2021б].

Допустимая нагрузка – это нагрузка ($L_{\text{доп}}$), ниже которой водоем остается в олиготрофном статусе [Гусаков, 1987]. Обоснование олиготрофного статуса в качестве референтного обусловлено следующим. Для олиготрофных водных объектов характерно высокое содержание растворенного кислорода (95–105 %), что создает благоприятные условия для ценных видов рыб.

Согласно [Дмитриев, 1995] олиготрофному статусу водного объекта соответствует соотношение $TN : TP = 35$. Учитывая изложенное, для расчетов допустимых нагрузок азотом общим было использовано следующее соотношение: $N_{\text{общ}} : P_{\text{общ}} = 35$ или $L_N = 35L_P$.

Результаты и обсуждение

Результаты расчетов допустимых биогенных нагрузок на трансграничные озера приведены в табл. 2.

Как следует из данных, приведенных в табл. 2, величины допустимых биогенных нагрузок на трансграничные озера существенно варьируют в зависимости от метода расчета. Например, для озера Гурон величина допустимой фосфорной нагрузки, рассчитанная по методу Фолленвайдера, равна 16 126 т/год, по методу Фолленвайдера и Диллона – 8038 т/год, а по методу Лозовика – 5672 т/год.

Таблица 1. Площадь водосбора, морфометрические и гидрологические характеристики трансграничных озер

Table 1. Catchment area, morphometric and hydrological characteristics of the transboundary lakes

Озеро Lake	Водосбор, км ² Catchment area, km ²	Средняя глубина, м Average depth, m	Площадь, км ² Area, km ²	Объем, км ³ Volume, km ³	Период водо- обмена, год Water ex- change period, year	Сопредельные страны Neighboring countries
Пюхьяярви Puhajärvi	1020	7,9	247	1,95	4,07	Россия, Финляндия Russia, Finland
Чудское Chudskoe	40 000	8,3	2613	21,79	2,15	Россия, Эстония Russia, Estonia
Нарвское водохранилище Narva reservoir	55 700	1,8	191,4	0,365	0,03	Россия, Эстония Russia, Estonia
Ханка Hanka	10 000	4,5	4190	18,3	9,5	Россия, Китай Russia, China
Выштынецкое Vyshtynetsкое	281,9	20	18,1	0,285	8,1	Россия, Литва Russia, Lithuania
Боденское Constance	11 500	90	536	48	0,69	Германия, Австрия, Швейцария Germany, Austria, Switzerland
Женевское Geneva	7975	152,7	584	89	11,8	Франция, Швейцария France, Switzerland
Лаго-Маджоре Lake Maggiore	6387	176,5	213	37	4,0	Италия, Швейцария Italy, Switzerland
Лугано Lugano	307	160	28	6,5	11,4	Италия, Швейцария Italy, Switzerland
Охридское Ohrid	3921	164	358	55,49	70	Албания, Македония Albania, Macedonia
Скадарское Skadar	5490	6	475	1,93	0,19	Албания, Черногория Albania, Montenegro
Гурон Huron	128 464	53	59 570	3543	22,6	Канада, США Canada, USA
Онтарио Ontario	75 272	86	19 009	1,64	7,9	Канада, США Canada, USA
Эри Erie	78 769	17,7	25 821	480	2,6	Канада, США Canada, USA
Верхнее Superior	124 838	148	82 367	12 000	191	Канада, США Canada, USA
Шамплейн Champlain	21 326	19,5	1331	25,8	2,48	Канада, США Canada, USA
Титикака Titicaca	58 000	107	8372	893	1343	Перу, Боливия Peru, Bolivia

Таблица 2. Допустимые биогенные нагрузки на трансграничные озера

Table 2. Permissible nutrient loads on the transboundary lakes

Озеро Lake	Метод Фолленвайдера Vollenweider's method		Метод Фолленвайдера и Диллона Vollenweider and Dillon's method		Метод Лозовика Lozovik's method	
	тР/год tonsP/ year	тN/год tonsN/ year	тР/год tonsP/ year	тN/год tonsN/ year	тР/год tonsP/ year	тN/год tonsN/ year
Пюхьяярви Pyhäjärvi	21,3	745,5	1,25	43,8	16,1	563,5
Чудское Chudskoe	233	8155	249	8715	290	10 150
Нарвское водохранилище Narva reservoir	6,8	238	135	4725	3015	105 525
Ханка Hanka	258	9030	81	2835	123	4305
Выштынецкое Vyshtynetsкое	2,7	94,5	1,7	59,5	1,4	49
Боденское Constance	199	6965	1280	44 800	743	26 005
Женевское Geneva	298	10 430	335	11 725	129	4515
Лаго-Маджоре Lake Maggiore	119	4165	282	9870	92,4	3234
Лугано Lugano	14,7	514,5	17,2	602	6,5	227,5
Охридское Ohrid	191	6685	78,6	2751	55,6	1946
Скадарское Skadar	35	1225	215	7525	665	23 275
Гурон Huron	16 126	564 410	8038	281 330	5672	198 520
Онтарио Ontario	6880	240 800	7886	276 010	3577	125 195
Эри Erie	3620	126 700	4592	160 720	3875	135 625
Верхнее Superior	41 291	1 445 185	9459	331 065	11 283	394 905
Шамплейн Champlain	198	6930	269	9415	220	7700
Титикака Titicaca	3455	120 925	251	8785	906	31 710

Методика расчета допустимой фосфорной нагрузки Фолленвайдера базируется только на одном морфометрическом показателе (средняя глубина водоема), а методика Фолленвайдера и Диллона – на одном морфометрическом (средняя глубина водоема) и одном гидрологическом (время полного водообмена) показателях. 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 морфометрические и гидрологические характеристики водного объекта, но и его ассимиляционную

(самоочистительную) способность в отношении соединений фосфора.

Учитывая, что озеро и его водосбор – единая природная система [Драбкова, Сорокин, 1979], представлялось целесообразным установить количественные соотношения между допустимыми фосфорными нагрузками на 17 трансграничных озер ($L_{доп}$) и площадями их водосборов (F). Результаты проведенного анализа приведены в табл. 3 и 4 и на рис. 1 и 2.

Согласно шкале Чеддока [Макарова, Трофимец, 2002], приведенные в табл. 3 значения коэффициентов корреляции свидетельствуют о весьма высокой тесноте связи между переменными ($\ln L_{доп}$ и $\ln F$) при использовании метода Лозовика и о высокой тесноте связи при при-

Таблица 3. Количественные соотношения между допустимыми фосфорными нагрузками на трансграничные озера и площадями их водосборов

Table 3. Quantitative relationships between the permissible phosphorus loads on the transboundary lakes and their catchment areas

Метод Method	Модель Model	Статистические характеристики Statistical characteristics			
		n	r	$\sigma_{y(x)}$	F_p/F_T
Фолленвайдера Vollenweider's	$\ln L_{доп} = -4,80 + 1,104 \ln F$	17	0,78	1,76	5,3
Фолленвайдера и Диллона Vollenweider and Dillon's	$\ln L_{доп} = -5,45 + 1,164 \ln F$	17	0,86	1,40	9,3
Лозовика Lozovik's	$\ln L_{доп} = -5,75 + 1,216 \ln F$	17	0,95	0,84	28,0

Примечание. n – количество озер, r – коэффициент корреляции, $\sigma_{y(x)}$ – стандартная ошибка, F_p – расчетное значение критерия Фишера, F_T – табличное значение критерия Фишера при уровне значимости 95 %.

Note. n – number of lakes, r – correlation coefficient, $\sigma_{y(x)}$ – standard error, F_p – calculated value of Fisher's criterion, F_T is the tabular value of the Fisher's test at a 95 % significance level. Here and in Tab. 4: $\ln L_{доп} - \ln L_{пер}$

Таблица 4. Количественные соотношения между допустимыми азотными нагрузками на трансграничные озера и площадями их водосборов

Table 4. Quantitative relationships between permissible nitrogen loads on the transboundary lakes and their catchment areas

Метод Method	Модель Model	Статистические характеристики Statistical characteristics			
		n	r	$\sigma_{y(x)}$	F_p/F_T
Фолленвайдера Vollenweider's	$\ln L_{доп} = -1,25 + 1,104 \ln F$	17	0,78	1,76	5,3
Фолленвайдера и Диллона Vollenweider and Dillon's	$\ln L_{доп} = -1,90 + 1,164 \ln F$	17	0,86	1,40	9,3
Лозовика Lozovik's	$\ln L_{доп} = -2,20 + 1,216 \ln F$	17	0,95	0,84	28,0

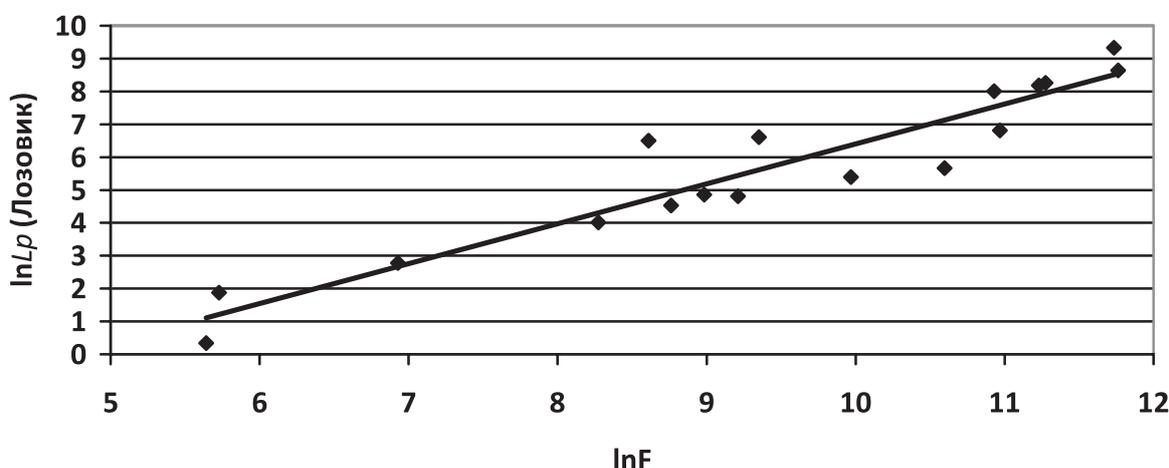


Рис. 1. Соотношение между натуральными логарифмами допустимых фосфорных нагрузок на трансграничные озера и натуральными логарифмами площадей их водосборов

Fig. 1. Relationship between natural logarithms of permissible phosphorus loads on the transboundary lakes and natural logarithms of their catchment areas

менении методов Фолленвайдера и Фолленвай-
дера и Диллона. Наиболее высокие значения
коэффициента корреляции и критерия Фишера
и наименьшее значение стандартной ошибки
установлено при применении метода Лозовика.

Как следует из статистических данных, при-
веденных в табл. 4, наиболее высокие значения
коэффициента корреляции и критерия Фишера
и наименьшее значение стандартной ошибки
установлено при применении метода Лозовика.

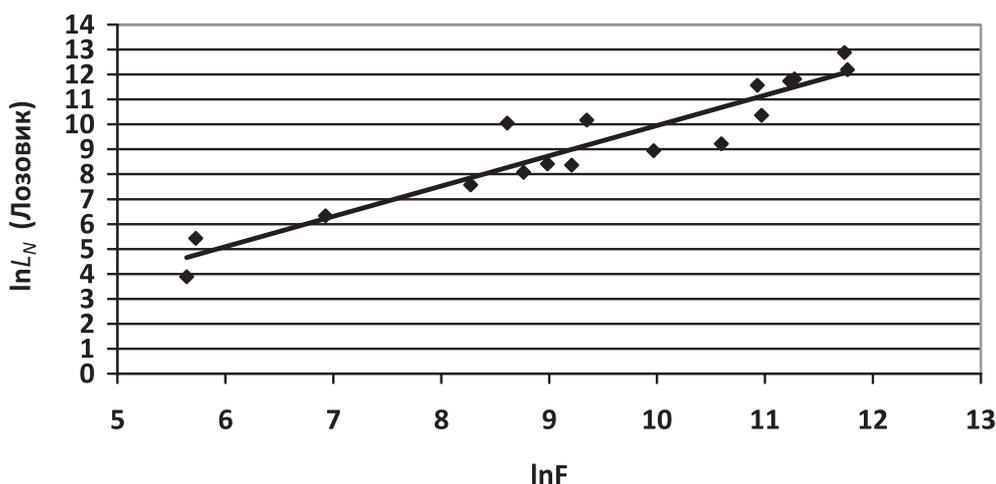


Рис. 2. Соотношение между натуральными логарифмами допустимых азотных нагрузок на трансграничные озера и натуральными логарифмами площадей их водосборов

Fig. 2. Relationship between natural logarithms of permissible nitrogen loads on the transboundary lakes and natural logarithms of their catchment areas

Приведенные в табл. 3 и 4 отношения F_p/F_T показывают, что $F_p > F_T$. Это означает, что все модели адекватны [Дрейпер, Смит, 1973].

Выводы

1. Достоверность определения величины допустимой биогенной нагрузки (фосфорной или азотной) на международный (трансграничный) водоем, позволяющая ему оставаться в олиготрофном статусе, зависит от метода расчета.

2. Установлены статистически значимые (адекватные) соотношения между допустимыми фосфорными и азотными нагрузками на семнадцать трансграничных водоемов и площадями их водосборов, что позволяет природоохранным организациям принимать обоснованные решения о необходимом снижении антропогенной нагрузки на эти водоемы.

Работа выполнена в Российском государственном педагогическом университете им. А. И. Герцена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Минпросвещения России (проект № FSN-2020-0016).

Литература

Гусаков Б. Л. Критическая концентрация фосфора в озерном притоке и ее связь с трофическим уровнем водоема / Ред. Н. А. Петрова, Б. Л. Гутельмахер. Л.: Наука, 1987. С. 7–17.

Даценко Ю. С. Эвтрофирование водохранилищ. Гидролого-гидрохимические аспекты. М.: ГЕОС, 2007. 252 с.

Дмитриев В. В. Диагностика и моделирование водных экосистем. СПб.: Изд-во СПбГУ, 1995. 216 с.

Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор – единая природная система. Л.: Наука, 1979. 195 с.

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 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.

Лозовик П. А., Фруммин Г. Т. Современное состояние и допустимые биогенные нагрузки на Псковско-Чудское озеро // Труды КарНЦ РАН. 2018. № 3. С. 3–10. doi: 10.17076/lim626

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.

Тимофеева Л. А., Фруммин Г. Т. Трансграничные водные объекты. СПб.: СпецЛит, 2017. 159 с.

Фруммин Г. Т. Расчет допустимой биогенной нагрузки на трансграничные водные объекты. Методическое пособие. СПб.: РГГМУ, 2013. 27 с.

Фруммин Г. Т., Кулинкович А. В., Горельшев А. Ю. Методы расчета допустимых фосфорных нагрузок на озера // Труды КарНЦ РАН. 2021а. № 4. С. 163–168. doi: 10.17076/lim1395

Фруммин Г. Т., Кулинкович А. В., Горельшев А. Ю., Калинин И. А. Программа расчета допустимых фосфорных нагрузок на пресноводные озера / Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Государственная регистрация программы для ЭВМ. Номер регистрации (свидетельства): 2021618650. Дата регистрации 31.05.2021б.

Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.

Поступила в редакцию 23.06.2021

References

Datsenko Yu. S. Evtrofirovaniye vodokhranilishch. Gidrologo-gidrokhimicheskie aspekty [Eutrophication of reservoirs. Hydrological and hydrochemical aspects]. Moscow: GEOS, 2007. 252 p.

Dmitriev V. V. Diagnostika i modelirovaniye vodnykh ekosistem [Diagnostics and modeling of aquatic ecosystems]. St. Petersburg: SPbGU, 1995. 216 p.

Drabkova V. G., Sorokin I. N. Ozero i ego vodosbor – edinaya prirodnyaya sistema [Lake and its catchment – a single natural system]. Leningrad: Nauka, 1979. 195 p.

Draper N., Smith G. Prikladnoi regressionnyi analiz [Applied regression analysis]. Moscow: Statistika, 1973. 392 p.

Frumin G. T. Raschet dopustimoi biogennoi nagruzki na transgranichnye vodnye ob'ekty. Metodicheskoe posobie [Calculation of the permissible nutrient load on transboundary water bodies: A study guide]. St. Petersburg: RGGMU, 2013. 27 p.

Frumin G. T., Kulinkovich A. V., Gorelyshev A. Yu. Metody rascheta dopustimyykh fosfornyykh nagruzok na ozera [Methods for calculating permissible phosphorus loadings on lakes]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2021a. No. 4. P. 163–168. doi: 10.17076/lim1395

Frumin G. T., Kulinkovich A. V., Gorelyshev A. Yu., Kalinin I. A. Programma rascheta dopustimyykh fosfornyykh nagruzok na presnovodnye ozera [A program for calculating permissible phosphorus loads on freshwater lakes]. *Fed. sluzhba po intellektual'noi sobstvennosti. Gos. reg. programmy dlya EVM* [Fed. Service for Intellectual Property. St. reg. of a computer program]. Registration (certificate) number: 2021618650. Registration date 05/31/20216.

Gusakov B. L. Kriticheskaya kontsentratsiya fosfora v ozernom pritoke i ee svyaz' s troficheskim urovnem vodoema [Critical concentration of phosphorus in the lake tributary and its relationship with the trophic level of the reservoir]. Eds. N. A. Petrova, B. L. Gutel'makher. Leningrad: Nauka, 1987. P. 7–17.

Henderson-Sellers B., Markland H. R. Umirayushchie ozera. Prichiny i kontrol' antropogennogo evtrofirovaniya [Dying lakes. Causes and control of anthropogenic eutrophication]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990. 280 p.

Lozovik P. A., Ryzhakov A. V., Sabylina A. V. Protssesy 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.

Lozovik P. A., Frumin G. T. Sovremennoe sostoyaniye i dopustimyye biogenyye nagruzki na Pskovsko-Chudskoye ozero [Present-day state and permissible nutrient loadings on Lake Peipus]. *Trudy KarNTs RAN* [Trans. KarRC RAS]. 2018. No. 3. P. 3–10. doi: 10.17076/lim626

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. Uchebnoye posobie [Eutrophication of lakes and reservoirs: A study guide]. St. Petersburg: RGGMU, 2007. 100 p.

Timofeeva L. A., Frumin G. T. Transgranichnye vodnye ob'ekty [Transboundary water bodies]. St. Petersburg: SpetsLit, 2017. 159 p.

Received June 23, 2021

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Фрумин Григорий Тевелевич

ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории 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.: 89111274098

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

Куликович 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

CONTRIBUTORS:

Frumin, Grigory

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

Gorelyshev, Alexey

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

Kulinkovich, Alexey

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