

Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 318—327.
Hydrometeorology and Ecology. 2024;(75):318—327.

Научная статья
УДК [556.114.7:543.225](282.247.211)
doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-318-327

Обоснование показателей качества воды по содержанию металлов в Онежском озере

Григорий Тевелевич Фрумин¹, Евгения Сергеевна Негодина²

¹ Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена (РГПУ), Санкт-Петербург, Россия, gfrumin@mail.ru

² Санкт-Петербургский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии

Аннотация. В статье приведены результаты расчетов региональных предельно допустимых концентраций девяти металлов (железо, марганец, хром, никель, медь, цинк, кадмий, свинец, алюминий) в воде Онежского озера. Для расчётов использованы три различных метода: метод С. А. Патина, метод Д. Г. Замолдчикова и метод Е. В. Веницианова и соавторов. На основе принципа санитарного максимализма обоснован оптимальный метод расчёта региональных предельно допустимых концентраций металлов — метод, разработанный Е. В. Венициановым и соавторами. Установлена «весьма высокая» теснота связи между региональными предельно допустимыми концентрациями металлов и их кларками в земной коре.

Ключевые слова: Онежское озеро, металлы, предельно допустимые концентрации, кларки.

Для цитирования: Фрумин Г. Т., Негодина Е. С. Обоснование показателей качества воды по содержанию металлов в Онежском озере // Гидрометеорология и экология. 2024. № 75. С. 318—327. doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-318-327.

Original article

Justification of water quality indicators for metal content in Lake Onega

Grigory T. Frumin¹, Evgenia S. Negodina²

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia

² St. Petersburg Branch of the Russian Federal Research Institute of Fishery and Oceanography

Summary. To correctly assess the degree of contamination of a water body with substances of dual origin, it is necessary to take into account the regional natural and climatic features of its catchment area. The most significant drawback of the federal fishery system of maximum permissible concentrations of harmful substances is the lack of consideration of the natural and climatic features of the catchment areas of specific water bodies (natural geochemical anomalies with different levels of natural compounds). The article presents the results of calculations of regional maximum permissible concentrations of nine metals (iron, manganese, chromium, nickel, copper, zinc, cadmium, lead, aluminum) in the water of the Lake Onega.

Three different methods were used for calculations: the method of S. A. Patina, D. G. method Zamolodchikov and the method of E. V. Venitsianov and co-authors. Based on the principle of sanitary maximalism, the optimal method for calculating regional maximum permissible concentrations of metals is substantiated — the method developed by E. V. Venitsianov and co-authors. The study used technology for calculating regional maximum permissible concentrations based on estimates of nonparametric statistical indicators. This technology, unlike other methodological approaches, makes it possible to take into account the volume of statistical samples under consideration and their variability. As a result of calculations, the following regional maximum permissible concentrations of metals in the water of the Lake Onega were determined: 129 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (iron), 4.7 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (manganese), 0.6 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (chrome), 0.9 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (nickel), 1.6 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (copper), 3.5 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (zinc), 0.04 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (cadmium), 0.4 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (lead), 230 $\mu\text{g}/\text{dm}^3$ (aluminum). A «very high» close relationship has been established between the regional maximum permissible concentrations of metals in the water of the Lake Onega and their clarkes in the earth's crust.

Key words: Lake Onega, metals, maximum permissible concentrations, clarks.

For citation: Frumin G. T., Negodina E. S. Justification of water quality indicators for metal content in Lake Onega. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2024;(75):318—327 (In Russ.). doi: 10.33933/2713-3001-2023-75-318-327.

Введение

В 1985 г. Верховный Совет СССР принял постановление, в котором различным министерствам и ведомствам было поручено провести комплекс научных исследований с целью перевода всей системы государственного контроля загрязнения окружающей среды в стране на экологическую основу. Предложено разработать принципиально новый экологический подход к нормированию антропогенных воздействий, которые в настоящее время основываются на предельно допустимых концентрациях (ПДК) загрязняющих веществ, имеющих для воды одного и того же объекта разные значения для различных водопользователей.

В течение длительного времени разрабатывались и используются два вида нормирования ПДК — гигиеническое и рыбохозяйственное. Как правило, второе много строже первого. Гигиенические нормативы ПДК предназначались для обеспечения безопасных условий водопользования для человека, а не для защиты экологического благополучия водоема.

Система контроля и регламентирования качества водной среды рыбохозяйственных водоемов основана на установлении ПДК загрязняющих веществ путем выполнения по определенной схеме экспериментов с гидробионтами. То есть, вредное воздействие определялось в лабораторных условиях на определенных, наиболее уязвимых организмах (планктонные ракообразные (главным образом дафнии), развивающаяся икра, личинки и молодь рыб, одноклеточные водоросли); предполагалось, что и остальные члены сообщества будут реагировать на токсиканты подобным образом.

Однако установлено, что последствия одновременного воздействия нескольких токсикантов неэквивалентны сумме последствий их индивидуального влияния. Такой эффект, как правило, обусловлен тем, что организм подвергается дополнительному влиянию продуктов, образующихся в результате химических реакций между токсикантами. Взаимовлияние может проявляться в различных формах, терминологически известных как антагонизм, синергизм, сенсibiliзация.

К сожалению, действующая система нормирования качества природных вод не обеспечивает сокращение антропогенной нагрузки на водную среду, поэтому неудивительно, что к настоящему времени к ней накопилось достаточно много претензий [1].

Примерно с 1990-х годов система предельно допустимых концентраций вредных веществ в водных объектах, имеющих рыбохозяйственное значение (ПДК_{РХ}), подвергается аргументированной критике, подробно изложенной в ряде работ [2—10].

Оценка качества поверхностных вод на основе общенациональных ПДК полностью игнорирует не только уникальность водосборов, но и их естественное природное разнообразие [11].

В идеале ПДК_{РХ} должны иметь региональный характер и могут отличаться на 3—7 порядков [1].

Цель исследования заключалась в обосновании региональных предельно допустимых концентраций металлов в Онежском озере — ПДК_{РЕГ}.

Отличие принятого нами подхода к установлению ПДК_{РХ} от традиционного заключается в том, что он основывается на конкретных данных мониторинга и не использует проведение лабораторных экспериментов с гидробионтами.

Материалы и методы исследования

Онежское озеро расположено в зоне Европейского Севера России, между 60°55'–62°55' с.ш., 34°14'—36°30' в.д. Административно акватория озера принадлежит трем субъектам Российской Федерации — Ленинградской, Вологодской областям и Республике Карелия (рис. 1).

Онежское озеро — крупнейший после Ладожского озера пресный водоем Европы и европейского северо-запада России. Оно представляет собой объект широкого комплексного использования: служит источником питьевого, коммунально-бытового и промышленного водоснабжения, является водохранилищем Верхне-Свирской ГЭС, воднотранспортной магистралью, приемником сточных вод, имеет большое рыбохозяйственное и рекреационное значение.

Площадь зеркала — 9720 км², максимальная глубина — 120 м, средняя глубина — 30 м, объем водной массы — 292 км³ [12].

Для расчетов ПДК_{РЕГ} были использованы первичные данные гидрохимического мониторинга, заимствованные из статей [13—15]. В этих публикациях приведены концентрации девяти металлов (железа, марганца, хрома, никеля, меди, цинка, кадмия, свинца и алюминия), то есть веществ двойного (естественного и техногенного) генезиса в различных районах Онежского озера (Большое Онего, Малое Онего, Южное Онего, Центральное Онего и т.д.) в различные сезоны 2019—2021 гг.

Расчеты ПДК_{РЕГ} для железа проведены только для открытой части озера.

Для расчетов ПДК_{РЕГ} использованы три различных метода, разработанных С. А. Патиным [16], Д. Г. Замолодчиковым [17] и Е. В. Венициановым с соавторами [18] (табл. 1).

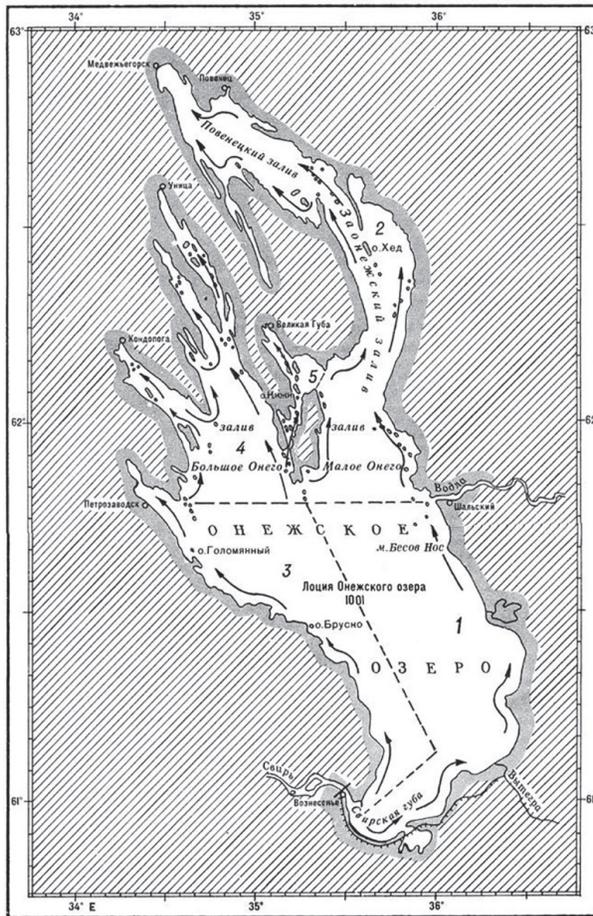


Рис. 1. Карта-схема Онежского озера.

Fig. 1. Scheme map of the Lake Onega.

Таблица 1

Математические модели для расчетов
региональных предельно допустимых концентраций

Mathematical models for calculating regional maximum allowable concentrations

Авторы метода	Модель ПДК _{РЕГ}
С. А. Патин	$ПДК_{РЕГ} = C_{СР} + 2\sigma$, $C_{СР}$ — средняя концентрация, мкг/дм ³ , σ — стандартное отклонение
Д. Г. Замолодчиков	$ПДК_{РЕГ} = ВК + 1,5(ВК - НК)$, ВК и НК — верхний и нижний квар- тили распределения
Е. В. Веницианов и соавторы	$ПДК_{РЕГ} = ВК - 2,9\sigma/\sqrt{N}$, где N — объем выборки

Результаты исследования

Значения N , C_{CP} , σ , ВК и НК для металлов в Онежском озере представлены в табл. 2. Для расчетов использован пакет прикладных программ Excel.

Таблица 2

Исходные показатели для расчетов региональных предельно допустимых концентраций металлов в Онежском озере, мкг/дм^3

Initial indicators for calculating regional maximum allowable concentrations of metals in the Lake Onega, $\mu\text{g/dm}^3$

Металл	N	C_{CP}	НК	ВК	σ
Fe	67	104	68,3	89	117,1
Mn	106	35,2	14	26	75,5
Cr	190	0,68	0,4	0,69	0,54
Ni	216	0,85	0,53	0,96	0,56
Cu	216	1,44	0,97	1,80	0,78
Zn	216	3,27	1,96	3,91	2,31
Cd	216	0,045	0,01	0,05	0,07
Pb	214	0,32	0,15	0,42	0,26
Al	62	194	30	296,6	180

По формулам, приведенным в табл. 1, тремя методами были рассчитаны величины $\text{ПДК}_{\text{РЕГ}}$ металлов в Онежском озере (табл. 3). В табл. 3 для последующего анализа добавлены значения ПДК металлов для рыбохозяйственных водных объектов ($\text{ПДК}_{\text{РХ}}$) и среднее содержание металлов в земной коре (кларки) [19].

Таблица 3

Региональные предельно допустимые концентрации металлов в Онежском озере, мкг/дм^3

Regional maximum allowable concentrations of metals in the Lake Onega, $\mu\text{g/dm}^3$

Авторы метода/металл	Fe	Mn	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	Al
С. А. Патин	495	186	1,8	2,0	3,0	7,9	0,2	0,8	554
Д. Г. Замолодчиков	279	44	1,1	1,6	3,0	6,8	0,1	0,8	697
Е. В. Веницианов и соавторы	129	4,7	0,6	0,9	1,6	3,5	0,04	0,4	230
$\text{ПДК}_{\text{РХ}}$, мкг/дм^3	100	10	20	10	1	10	1	6	40
Кларк, мг/кг	40600	770	92	50	39	75	0,64	17	76100

Приведенные в табл. 3 результаты расчетов $\text{ПДК}_{\text{РЕГ}}$ показывают существенные различия этих величин в зависимости от метода расчета. Например, $\text{ПДК}_{\text{РЕГ}}$ марганца в Онежском озере равна 186 мкг/дм^3 при расчете методом С. А. Патина и $4,7 \text{ мкг/дм}^3$ при расчете методом Е. В. Веницианова с соавторами, то есть различие составляет 39,6 раз. Как следует из табл. 3, наименьшие величины $\text{ПДК}_{\text{РЕГ}}$ зафиксированы для каждого из девяти рассмотренных металлов при использовании метода Е. В. Веницианова с соавторами.

Центральное место при регламентации воздействия вредных веществ на человека и гидробионтов занимает «принцип санитарного максимализма»: когда все

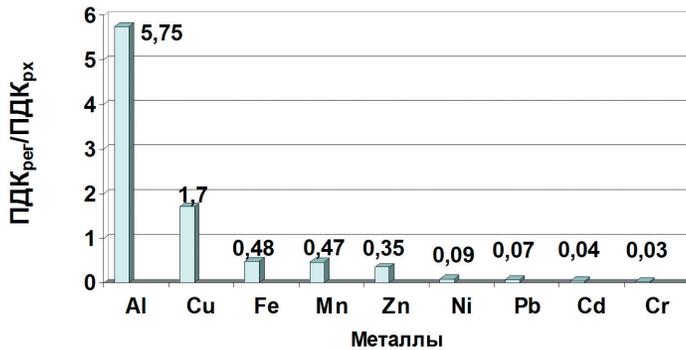


Рис. 2. Отношение региональных предельно допустимых концентраций металлов в Онежском озере к предельно допустимым концентрациям металлов для рыбохозяйственных водоемов.

Fig. 2. Ratio of regional maximum allowable metal concentrations in the Lake Onega to maximum allowable metal concentrations for fishery reservoirs.

неоднозначно, все неопределенно, нормативы трактуются в сторону ужесточения, то есть в сторону снижения показателя [20].

Иными словами, в качестве оптимального метода расчетов ПДК_{рег} следует рассматривать метод, разработанный Е. В. Венициановым и соавторами.

В то же время действующая методика расчета такого широко обсуждаемого норматива как НДВ (норматив допустимого воздействия), наоборот, требует ослабления норматива, то есть, чем меньше имеем информации о состоянии водного объекта, тем менее жесткие нормативы предлагаются для него.

В исследовании использована технология расчетов региональных ПДК на основе оценок непараметрических статистических показателей. Данная технология, в отличие от других методических подходов, позволяет учитывать объем рассматриваемых статистических выборок и их изменчивость.

По данным табл. 3 рассчитаны отношения ПДК_{рег}/ПДК_{рх} (рис. 2).

Приведенные на рис. 2 данные свидетельствуют о том, что ПДК_{рег}, рассчитанные методом Е. В. Веницианова и соавторов, для алюминия и меди больше общефедеральных величин ПДК_{рх}, а для других металлов — меньше.

Соотношение между натуральными логарифмами ПДК_{рег} и натуральными логарифмами кларков металлов в земной коре представлено на рис. 3.

Линия регрессии, приведенная на рис. 3, описывается следующей формулой:

$$\ln \text{ПДК}_{\text{рег}} = -2,674 + 0,674 \ln(\text{кларк}), \quad (1)$$

$$n = 9; r = 0,971; r^2 = 0,942; \sigma = 0,665; F_p = 113,61; F_T = 5,32; F_p/F_T = 21,4$$

n — количество металлов, r — коэффициент корреляции, r^2 — коэффициент детерминации, σ — стандартная ошибка, F_p — расчетное значение критерия Фишера, F_T — табличное значение критерия Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

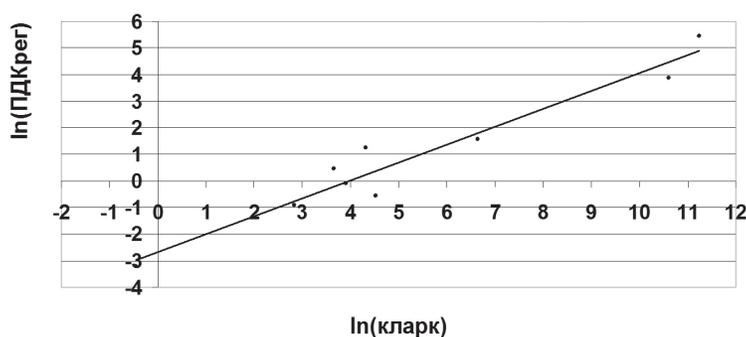


Рис. 3. Соотношение между натуральными логарифмами региональных предельно допустимых концентраций металлов в Онежском озере и кларками металлов в земной коре.

Fig. 3. Correlation between natural logarithms of regional maximum allowable concentrations of metals in the Lake Onega and clarks of metals in the Earth's crust.

Приведенные статистические характеристики позволяют оценить адекватность формулы (1) и ее пригодность для прогнозирования величин ПДК_{рег} для других металлов.

Согласно шкале Чеддока, соотношение между величинами ПДК_{рег} и кларками характеризуется «весьма высокой» теснотой связи между переменными ($r > 0,9$) [21]. Зависимость (1) адекватна ($F_p > F_T$) и полезна для предсказания величин ПДК_{рег} для других металлов ($F_p/F_T > 4$) [22].

Выводы

1. Для корректной оценки степени загрязненности водного объекта веществами двойного генезиса необходимо учитывать региональные природно-климатические особенности его водосбора. Наиболее существенный недостаток федеральной системы рыбохозяйственных предельно допустимых концентраций вредных веществ — отсутствие учета природно-климатических особенностей водосборов конкретных водных объектов (естественные геохимические аномалии с различным уровнем содержания природных соединений).

2. Различными авторами предложены методы расчётов региональных предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ в водных объектах (ПДК_{рег}). Для расчётов ПДК_{рег} металлов в Онежском озере использованы три наиболее популярных метода: метод С. А. Патина, метод Д. Г. Замолодчикова и метод Е. В. Веницианова и соавторов. Следуя принципу санитарного максимализма, установлено, что в качестве оптимального метода расчётов ПДК_{рег} следует рассматривать метод, разработанный Е. В. Венициановым и соавторами.

3. Обоснованы региональные предельно допустимые концентрации девяти металлов (железа, марганца, хрома, никеля, меди, цинка, кадмия, свинца и алюминия) в воде Онежского озера.

4. Теснота связи между натуральными логарифмами региональных предельно допустимых концентраций шести металлов в воде Онежского озера и натуральными логарифмами их кларков по шкале Чеддока характеризуется как «весьма высокая».

Список литературы

1. Тимофеева Л. А., Фрумин Г. Т. Проблемы нормирования качества поверхностных вод // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. 2015. № 38. С. 215—229.
2. Волков И. В., Заличева И. Н., Шустова Н. К., Ильмаст Т. Б. Есть ли экологический смысл у общенациональных рыбохозяйственных ПДК? // Экология. 1996. № 5. С. 350—354.
3. Дмитриев В. В., Фрумин Г. Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. Учебное пособие. СПб.: Наука. 2004. 295 с.
4. Левич А. П., Терехин А. Т. Метод расчета экологически допустимых уровней воздействия на пресноводные экосистемы // Водные ресурсы. 1997. № 3. С. 328—335.
5. Гагарина О. В. Оценка и нормирование качества природных вод: критерии, методы, существующие проблемы. Учебно-методическое пособие. Ижевск: Удмуртский университет. 2012. 199 с.
6. Рисник Д. В., Беляев С. Д., Булгаков Н. Г. и др. Подходы к нормированию качества окружающей среды. Методы, альтернативные существующей системе нормирования в Российской Федерации // Успехи современной биологии. 2013. Т. 133. С. 3—18.
7. Строков А. А. Особенности нормирования качества воды при разработке нормативов допустимого воздействия на водные объекты // Вестник РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2014. № 3. С. 105—109.
8. Моисеенко Т. И. Оценка качества вод и «здоровье» экосистем с позиций экологической парадигмы // Водное хозяйство России. 2017. № 3. С. 104—124. doi: 10.35567/1999—4508—2017—3—7.
9. Фрумин Г. Т. Оценка состояния водных объектов и экологическое нормирование. СПб.: Синтез, 1998. 96 с.
10. Фрумин Г. Т. Экологически допустимые концентрации металлов в реках Санкт-Петербурга // Экологическая химия. 2015. № 24(2). С. 105—110.
11. Фрумин Г. Т., Негодина Е. С. Региональные предельно допустимые концентрации металлов в Псковском озере // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 66—72. doi: 10.17076/lim1760.
12. Румянцев В. А., Драбкова В. Г., Измайлова А. В. Озера европейской части России. СПб.: ЛЕМА. 2015. 392 с.
13. Lake Onega water chemical composition based on seasonal field surveys in 2019—2021 2022: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://data.mendeley.com/datasets/k4f59fyhmy> (дата обращения: 25.04.2024). doi: 10.1016/j.dib.2022.108079.
14. Санин А. Ю., Строков А. А., Терский П. Н. Оценка влияния природных процессов на содержание тяжелых металлов в воде Онежского озера // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2020. Т. 65. Вып. 1. С. 146—171. doi: 10.21638/spbu07.2020.108.
15. Санин А. Ю., Строков А. А., Кошовский Т. С. Распределение металлов в прибрежной зоне Онежского озера в зависимости от типа берега // География и природные ресурсы. 2022. №2. С. 34—43. doi: 10.15372/GIPR20220204.
16. Патин С. А. Влияние загрязнения на биологические ресурсы и продуктивность Мирового океана. М.: Пищевая промышленность. 1979. 304 с.
17. Замолодчиков Д. Г. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеоздат, 1993. Т. 15. С. 214—233.
18. Веницианов Е. В., Мирошниченко С. А., Лепихин А. П., Губернаторова Т. Н. Разработка и обоснование региональных показателей качества воды по содержанию тяжелых металлов для водных объектов бассейна Верхней Камы // Водное хозяйство России. 2015. № 3. С. 50—64.
19. Григорьев Н. А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: Уро РАН, 2009. 382 с.

20. Возняк А. А., Лепихин А. П. Разработка региональных ПДК: необходимость, методика, пример // Географический вестник. 2018. № 2(45). С. 103—114.
21. Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. М.: Финансы и статистика. 2002. 368 с.
22. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика. 1986. 366 с.

References

1. Timofeeva L. A., Frumin G. T. Problems of standardization of surface water quality. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2015; (38): (215—229). (In Russ.).
2. Volkov I. V., Zalicheva I. N., Shustova N. K., Ilmast T. B. Does the federal fishery MPC make any ecological sense? *Ekologiya = Ecology*. 1996; (5):(350—354). (In Russ.).
3. Dmitriev V. V., Frumin G. T. *Ekologicheskoye normirovaniye i ustoychivost' prirodnykh system. Uchebnoye posobiye = Environmental regulation and sustainability of natural systems. Tutorial. SPb.: Science, 2004; 295 p.* (In Russ.).
4. Levich A. P., Terekhin A. T. A method for calculating environmentally acceptable levels of impact on freshwater ecosystems. *Vodnyye resursy = Water Resources*. 1997; (3):(328—335). (In Russ.).
5. Gagarina O. V. *Otsenka i normirovaniye kachestva prirodnykh vod: kriterii, metody, sushchestvuyushchiye problemy. Uchebno-metodicheskoye posobiye = Assessment and regulation of the quality of natural waters: criteria, methods, existing problems: Study guide*. Izhevsk: Udmurtskii universitet, 2012; 199 p. (In Russ.).
6. Risnik D. V., Belyaev S. D., Bulgakov N. G. et al. Approaches to standardization of environmental quality. Methods alternative to the existing system of regulation in the Russian Federation. *Uspekhi sovremennoy biologii = Successes of Modern Biology*. 2013; (133): (3—18). (In Russ.).
7. Stokov A. A. Features of water quality regulation in the development of standards for permissible impact on water bodies. *Vestnik RUDN. Ser. Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Bulletin of RUDN University. Ser. Ecology and Life Safety*. 2014; (3):(105—109). (In Russ.).
8. Moiseenko T. I. Assessment of water quality and the “health” of ecosystems from the standpoint of the ecological paradigm. *Vodnoye khozyaystvo Rossii = Water Management of Russia*. 2017; (3):(104—124). (In Russ.) doi: 10.35567/1999—4508—2017—3—7.
9. Frumin G. T. *Otsenka sostoyaniya vodnykh ob'yektov i ekologicheskoye normirovaniye = Assessment of the state of water bodies and environmental regulation*. St. Petersburg: Sintez, 1998; 96 p. (In Russ.).
10. Frumin G. T. Environmentally acceptable concentrations of metals in the rivers of St. Petersburg. *Ekologicheskaya khimiya = Ecological Chemistry*. 2015; (2):(105—110). (In Russ.).
11. Frumin G. T., Negodina E. S. Regional maximum permissible concentrations of metals in Pskov Lake. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2023; (6): (66—72). (In Russ.) doi: 10.17076/lim1760.
12. Rumyantsev V. A., Drabkova V. G., Izmailova A. V. *Ozera yevropeyskoy chasti Rossi = Lakes of the European part of Russia*. SPb.: LEMA, 2015; 392 p. (In Russ.).
13. Lake Onega water chemical composition based on seasonal field surveys in 2019—2021 2022: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://data.mendeley.com/datasets/k4f59fyhmy> (дата обращения: 25.04.2024). doi: 10.1016/j.dib.2022.108079.
14. Sanin A. Yu., Stokov A. A., Tersky P. N. Assessment of the influence of natural processes on the content of heavy metals in the water of Lake Onega. *Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle = Bulletin of St. Petersburg State University. Geosciences*. 2020; (65):(146—171). (In Russ.) doi: 10.21638/spbu07.2020.108.
15. Sanin A. Yu., Stokov A. A., Koshovsky T. S. Distribution of metals in the coastal zone of Lake Onega depending on the type of shore. *Geografiya i prirodnyye resursy = Geography and natural resources*. 2022; (2):(34—43). (In Russ.) doi: 10.15372/GIPR20220204.
16. Patin S. A. *Vliyaniye zagryazneniya na biologicheskoye resursy i produktivnost' Mirovogo okeana = Impact of pollution on biological resources and productivity of the World Ocean*. Moscow: Food industry, 1979; 304 p. (In Russ.).
17. Zamolodchikov D. G. *Problemy ekologicheskogo monitoringa i modelirovaniya ekosistem = Problems of ecological monitoring and modeling of ecosystems*. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993; Vol. 15. P. 214—233. (In Russ.)

18. Venitsianov E. V., Miroshnichenko S. A., Lepikhin A. P., Gubernatorova T. N. Development and substantiation of regional indicators of water quality in terms of the content of heavy metals for water bodies of the Upper Kama basin. *Vodnoye khozyaystvo Rossii = Water Management of Russia*. 2015; (3):(50—64). (In Russ.)
19. Grigoriev N. A. Raspredeleniye khimicheskikh elementov v verkhney chasti kontinental'noy kory = *Distribution of chemical elements in the upper part of the continental crust*. Ekaterinburg: Uro RAS, 2009; 382 p. (In Russ.)
20. Voznyak A. A., Lepikhin A. P. Development of regional MACs: necessity, methodology, example. *Geograficheskiy vestnik = Geographic Bulletin*. 2018;(2):(103—114). (In Russ.)
21. Makarova N. V., Trofimets V. Ya. *Statistika v Excel = Statistics in Excel*. Moscow: Finance and statistics, 2002; 368 p. (In Russ.)
22. Draper N., Smith G. *Prikladnoy regressionnyy analiz = Applied regression analysis*. Moscow: Finance and statistics, 1986; 366 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Григорий Тевелевич Фрумин, доктор химических наук, профессор, Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории факультета географии, gfrumin@mail.ru.

Евгения Сергеевна Негодина, Санкт-Петербургский филиал «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л. С. Берга), аспирант, 10020092@rambler.ru.

Information about authors

Grigory Tevelevich Frumin, Doctor of Chemical Sciences, professor, Herzen State Pedagogical University of Russia, leading researcher at the research laboratory of the Faculty of Geography, gfrumin@mail.ru.

Evgenia Sergeevna Negodina, St. Petersburg branch of “VNIRO” (“GosNIORH” named after L. S. Berg), graduate student, 10020092@rambler.ru.

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 22.12.2023

Принята к печати после доработки 29.04.2024

The article was received on 22.12.2023

The article was accepted after revision on 29.04.2024