Научная статья
УДК 504.4, 574.5
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_53–59

ВЫЯВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ СОДЕРЖАНИЯ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ТРОФИЧЕСКИМ СТАТУСОМ ВОДОХРАНИЛИЩА СЕСТРОРЕЦКИЙ РАЗЛИВ

Анастасия Александровна Алефирова[1], Иван Владимирович Антонов[1], Асель Жумагалиевна Адылова[2]

[1]Высшая школа технологии и энергетики, Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия

[2]Санкт-Петербургское государственное бюджетное профессиональное образовательное учреждение «Пожарно-спасательный колледж „Санкт-Петербургский центр подготовки спасателей“», Санкт-Петербург, Россия

© Алефирова А. А., Антонов И. В., Адылова А. Ж., 2026

Автор-корреспондент: А. А. Алефирова, e-mail: anastasiaalefirova3@gmail.com

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты пятилетнего гидрохимического мониторинга (с 2021 по 2025 г.) водохранилища Сестрорецкий Разлив, расположенного в зоне интенсивной рекреационной нагрузки. Цель исследования — установление взаимосвязи между концентрациями биогенных элементов (аммоний-ион, нитрит-ион, нитрат-ион и фосфат-ион) и трофическим статусом водного объекта. Отбор проб производился в 9 постоянных точках с учетом сезонной динамики. Определение концентраций азотсодержащих веществ выполнено фотометрическим методом (реактивы Несслера и Грисса), фосфатов — колориметрическим методом с молибдатом аммония, нитратов — ионометрическим методом. При анализе сезонной динамики индекса трофического состояния (ИТС) за 2021–2025 гг. выявлена устойчивая закономерность: минимальные значения отмечаются весной (6,4–7,9) из-за низких температур воды, несмотря на поступление биогенов с половодьем; летом фиксируются пиковые показатели (8,1–8,7) вследствие оптимальных термических условий и стратификации водных масс; осенью значения остаются высокими (7,3–10,2) за счёт минерализации отмершей биомассы и вторичного высвобождения биогенов. Анализ средних значений индекса загрязненности воды (ИЗВ) по сезонам 2021–2025 гг. показал устойчивое повышение показателя в осенний период по сравнению с весной и летом. Выявленная динамика согласуется с механизмом: летняя стратификация и прогрев вод способствуют развитию водорослей, а осенняя минерализация отмершей биомассы и перемешивание водных масс обусловливают вторичное повышение трофности. Исследуемая часть водохранилища классифицирована как эвтрофный водоем с тенденцией к дальнейшему ухудшению качества воды. Установлен коэффициент корреляции Пирсона $R = 0{,}789$, подтверждающий прямую связь между ростом биогенной нагрузки и эвтрофикацией водоема. Также в работе получено уравнение линейной регрессии, позволяющее прогнозировать трофность при изменении концентраций биогенов.

Ключевые слова: эвтрофикация, биогенные элементы, трофический статус, индекс загрязнения воды, гидрохимический мониторинг, водохранилище Сестрорецкий Разлив, фосфаты, азот, качество воды

Для цитирования: Алефирова А. А., Антонов И. В., Адылова А. Ж. Выявление взаимосвязи содержания биогенных элементов с трофическим статусом водохранилища Сестрорецкий Разлив // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 53–59. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_53–59.

RELATIONSHIP BETWEEN BIOGENIC ELEMENT CONTENT AND TROPHIC STATUS OF THE SESTRORETSKY RAZLIV RESERVOIR

Anastasia Alexandrovna Alefirova[1], Ivan Vladimirovich Antonov[1], Asel' Zhumagalievna Adylova[2]

[1]Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia

[2]St. Petersburg State Budgetary Professional Educational Institution «Fire and Rescue College "St. Petersburg Rescue Training Center"», St. Petersburg, Russia

Corresponding author: A. A. Alefirova, e-mail: anastasiaalefirova3@gmail.com

ABSTRACT

The paper presents the results of five-year hydrochemical monitoring (from 2021 to 2025) of the Sestroretsky Razliv Reservoir located in the zone of intensive recreational load. The purpose of this study is to determine the relationship between the concentrations of biogenic elements (ammonium, nitrite, nitrate and phosphate ions) and the trophic status of the water body. Sampling was performed at nine permanent stations, taking into account seasonal dynamics. The concentrations of nitrogen-containing substances were determined using the photometric method (Nessler's and Griess reagents), phosphate — using the colorimetric method with ammonium molybdate, and nitrate — using the ionometric method. An analysis of the seasonal dynamics of the trophic state index (TSI) over 2021–2025 revealed a consistent pattern: minimum values occur in spring (6.4–7.9) owing to low water temperatures, despite nutrient input during the flood period; peak values are recorded in summer (8.1–8.7) due to optimal thermal conditions and stratification of the water masses; in autumn, values remain high (7.3–10.2) because of the dead biomass mineralisation and secondary release of nutrients. An analysis of the average water pollution index (WPI) values by season over 2021–2025 showed a consistent increase in the parameter in autumn compared with spring and summer. The revealed dynamics is consistent with the mechanism whereby summer stratification and warming favour algal growth, while autumn mineralisation of dead biomass and water mixing cause a secondary increase in trophic statu. The investigated part of the reservoir is classified as a eutrophic water body with a tendency to further water quality deterioration. A Pearson correlation coefficient of R = 0.789 was calculated, which confirms a direct relationship between the growth of biogenic load and the eutrophication of the water body. A linear regression equation was also derived in this study, making it possible to predict trophic status from changes in biogenic element concentrations.

Keywords: eutrophication, biogenic elements, trophic status, water pollution index, hydrochemical monitoring, Sestroretsky Razliv Reservoir, phosphates, nitrogen, water quality

For citation: Alefirova A. A., Antonov I. V., Adylova A. Zh. (2026) 'Relationship between biogenic element content and trophic status of the Sestroretsky Razliv reservoir', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 53–59. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_53–59.

ВВЕДЕНИЕ

Сохранение устойчивого состояния пресноводных экосистем является одной из приоритетных задач в настоящее время. Водохранилища, выполняющие функции регулирования стока, водоснабжения, поддержки биоразнообразия и рекреации, испытывают значительную антропогенную нагрузку. Среди наиболее распространенных негативных процессов выделяется эвтрофикация, приводящая к неконтролируемому развитию фитопланктона, снижению прозрачности воды, дефициту кислорода в придонных слоях [1–3].

Ключевую роль в процессах эвтрофикации играют соединения азота и фосфора, которые поступают в водные объекты с поверхностным стоком с сельскохозяйственных угодий, неочищенными или недостаточно очищенными сточными водами, поверхностным стоком и в результате рекреационной нагрузки [4–6]. Поступление биогенных элементов в водные экосистемы и изменение трофического статуса осуществляется через механизмы как внешнего, так и внутреннего питания водоема. Внутренние источники связаны с высвобождением питательных веществ из донных отложений в условиях кислородного дефицита, что может значительно усиливать негативные последствия [7, 8].

Объектом исследования являлось водохранилище Сестрорецкий Разлив, расположенное в Курортном

районе Санкт-Петербурга. В настоящее время оно выполняет важную рекреационную функцию, ежегодно принимая тысячи отдыхающих.

В работе определены закономерности в динамике содержания биогенных элементов в воде и трофическим статусом для участка акватории водохранилища Сестрорецкий Разлив. При этом решался ряд задач:

1) Провести отбор проб воды в соответствии с нормативными требованиями.
2) Определить концентрации биогенных элементов физико-химическими методами.
3) Рассчитать индексы трофического состояния (ИТС) и загрязненности воды (ИЗВ) за период с 2021–2025 гг.
4) Выявить корреляционные связи между показателями.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Водохранилище Сестрорецкий Разлив — водоем озерного типа, расположенный в восточной части города Сестрорецк. Площадь водного зеркала составляет 1,7 км^2, средняя глубина — 2,5–3,0 м, длина береговой линии — около 23 км. Питание водоема осуществляется за счет рек Сестра и Черная.

Отбор проб воды проводился в соответствии с рекомендациями [9] на 9 постоянных станциях, местоположение которых показано на рисунке 1, охватывающих основные участки акватории водохранилища, которые подвержены наибольшему антропогенному воздействию. Отбор проб осуществлялся весной, летом и осенью в период с 2021–2025 гг.

Местонахождение точек отбора проб:
46 — Сестрорецкое водохранилище, у берега, перед плотиной Гаусмана;
46/1 — Водосливной канал, у берега, в нижнем бьефе плотины Гаусмана;
47 — река Малая Сестра, исток;
47/1 — река Малая Сестра, напротив здания администрации Курортного района;
48 — Сестрорецкое водохранилище, перед мостом Приморского шоссе;
48/2 — Сестрорецкое водохранилище, у берега, Офицерский пляж;
49/1 — Сестрорецкое водохранилище, у фонтана;
49/5 — Сестрорецкое водохранилище, причал у Храма святых первоверховных апостолов Петра и Павла;
50 — Сестрорецкое водохранилище, центральный участок.

Оценка трофического статуса проводилась по индексу трофического состояния [10–11], разработанному для водоемов с учетом pH и содержания кислорода. Расчет производился по формуле (1):

$$ИТС = \frac{\sum_{i=n}^{n} pH_i}{n} + a\left(100 - \frac{\sum_{i=n}^{n}[O_2]}{n}\right), \qquad (1)$$

где pH_i — значение pH, измеренное за определённый период;
$[O_2]$ — O_2, в процентах насыщения, %;
n — количество измерений;
a — коэффициент, определяемый по формуле (2):

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(pH_i \cdot [O_2]\right) - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(pH_i \cdot [O_2]\right)}{n}}{\sum_{i=1}^{n}[O_2]^2 - \frac{\sum_{i=1}^{n}[O_2]^2}{n}}, \qquad (2)$$

где pH_i — значение pH, измеренное за определённый период;
$[O_2]$ — O_2, в процентах насыщения, %;
n — количество измерений.



Рисунок 1. Карта-схема водохранилища Сестрорецкий Разлив с указанием точек отбора проб

Figure 1. Schematic map of the Sestroretsky Razliv reservoir with sampling points indicated

Интерпретация значений ИТС представлена в таблице 1.

Таблица 1. Классификация водных объектов по индексу трофического состояния

Table 1. Classification of water bodies according to the trophic state index

Продукционно-деструкционный баланс	Экологическое состояние	ИТС
Отрицательный П<Д	Дистрофное	< 5,7 ± 0,3
	Ультраолиготрофное	6,3 ± 0,3
Нулевой П=Д	Олиготрофное	7,0 ± 0,3
Положительный П>Д	Мезотрофное	7,7 ± 0,3
	Эвтрофное	> 8,3 ± 0,3

Для оценки биогенной загрязненности воды использовался индекс загрязнения воды (ИЗВ), рассчитываемый по формуле (3) [12]:

$$ИЗВ = \sum\left(\frac{Ci}{ПДКi}\right)\Big/6, \qquad (3)$$

где *Ci* — измеренная концентрация i-го показателя, мг/л; ПДК*i* — предельно допустимая концентрация для водных объектов рыбохозяйственного назначения.

Класс качества и диапазоны ИЗВ представлены в таблице 2.

Таблица 2. Значения класса качества и диапазона индекса загрязнения воды

Table 2. Water quality grade values and water pollution index ranges

Класс качества вод		Диапазон значений ИЗВ
Очень чистые	I	ИЗВ < 0,3
Чистые	II	0,3 < ИЗВ < 1
Умеренно загрязненные	III	1 < ИЗВ < 2,5
Загрязненные	IV	2,5 < ИЗВ <4,00
Грязные	V	4,00 < ИЗВ < 6,00
Очень грязные	VI	6,00 < ИЗВ < 10,00
Чрезвычайно грязные	VII	ИЗВ > 10,00

Статистическая обработка данных выполнена с использованием пакета MS Excel. Для оценки силы связи между показателями применялся коэффициент корреляции Пирсона (R) [13]. Достоверность различий оценивалась при уровне значимости $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе пятилетнего мониторинга было проанализировано 224 пробы воды. На рисунке 2 представлена динамика средних годовых значений ИТС и ИЗВ за период с 2021 по 2025 г., которая демонстрирует устойчивую тенденцию к увеличению показателей.

Среднее значение ИТС за весь период составило 8,04, что соответствует эвтрофному типу водоема. Минимальное значение зафиксировано в 2022 г. (ИТС = 7,7), максимальное — 2025 г. (ИТС = 8,3). Сезонная динамика ИТС представлена в таблице 3. По показателю ИЗВ среднее значение в 2021–2025 гг. составило 1,24, что соответствует умеренно загрязненному качеству воды. Минимальное значение зафиксировано в 2022 г. (ИЗВ = 0,8), максимальное — 2025 г. (ИЗВ = 1,9). Сезонная динамика ИЗВ представлена в таблице 4.

Таблица 3. Сезонная динамика индекса трофического состояния (ИТС) в 2021–2025 гг.

Table 3. Seasonal dynamics of the trophic state index (TSI) over 2021–2025

Год	Весна	Лето	Осень
2021	7,1	8,7	7,9
2022	–	8,1	7,3
2023	7,9	8,3	8,0
2024	6,4	8,1	10,2
2025	–	8,3	–

Анализ сезонной динамики индекса трофического состояния (ИТС) за 2021–2025 гг. показывает устойчивую закономерность: минимальные значения отмечаются весной (6,4–7,9) из-за низких температур воды, несмотря на поступление биогенов с половодьем; летом фиксируются пиковые показатели (8,1–8,7) вследствие оптимальных термических условий и стратификации водных масс; осенью значения остаются высокими (7,3–10,2) за счёт минерализации отмершей биомассы и вторичного высвобождения биогенов.

Таблица 4. Средние значения ИЗВ по сезонам в 2021–2025 гг.

Table 4. Average WPI values by season in 2021–2025

Год	Весна	Лето	Осень
2021	0,8	0,9	1,1
2022	–	0,6	1,0
2023	0,6	0,7	2,6
2024	1,1	0,9	1,8
2025	–	1,9	–

Анализ средних значений ИЗВ по сезонам 2021–2025 гг. показал устойчивое повышение показателя в осенний период по сравнению с весной и летом во все годы с полными данными (осенние максимумы: 1,1–2,6 против летних 0,6–1,9 и весенних 0,6–1,1). Наиболее выраженный пик зафиксирован в 2023 г. (2,6), а в 2025 г. аномально высокое летнее значение (1,9) может указывать на вероятный рост осенней

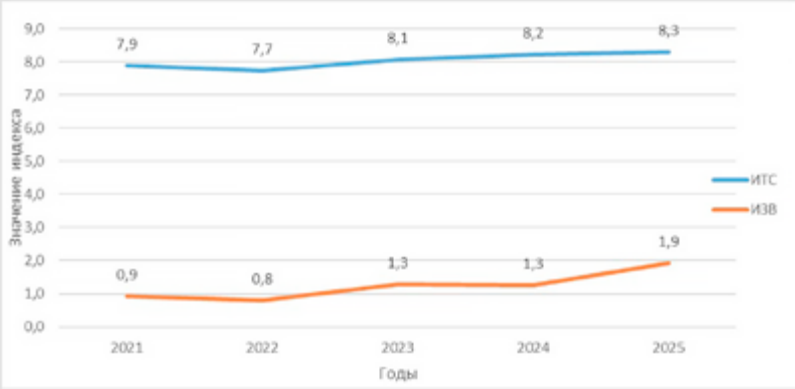


Рисунок 2. Динамика средних годовых значений индекса трофического состояния (ИТС) и индекса загрязненности воды (ИЗВ) за 2021–2025 гг.

Figure 2. Dynamics of mean annual trophic state index (TSI) and water pollution index (WPI) values over 2021–2025

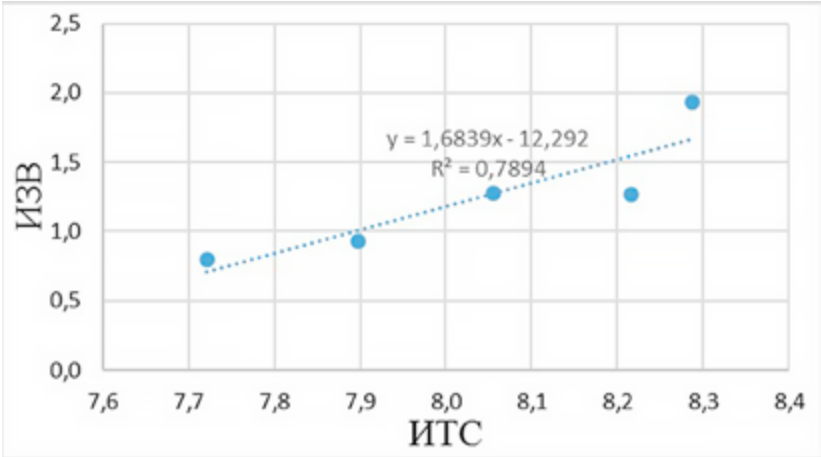


Рисунок 3. Зависимость трофности от биогенных элементов

Figure 3. Dependence of trophic level on biogenic elements

нагрузки. Выявленная динамика согласуется с описанным механизмом: летняя стратификация и прогрев вод способствуют развитию водорослей, а осенняя минерализация отмершей биомассы и перемешивание водных масс обусловливают вторичное повышение трофности.

Для количественной оценки связи между биогенной нагрузкой и трофностью был проведен корреляционно-регрессионный анализ. На рисунке 3 представлена диаграмма, отражающая зависимость между значениями ИТС и ИЗВ.

Коэффициент корреляции Пирсона составил $R = 0{,}789$ ($p < 0{,}001$), что свидетельствует о сильной прямой связи. Полученное уравнение линейной регрессии имеет вид:

$$ИТС = 1{,}6839 \times ИЗВ - 12{,}292.$$

Данная модель позволяет с достоверностью 78,9 % прогнозировать изменение трофического статуса водоема при изменении уровня загрязнения биогенными элементами. Например, увеличение ИЗВ на 1,0 единицу приводит к росту ИТС на 1,68 единицы, что соответствует переходу водоема в более высокий трофический класс.

Вместе с тем, анализ регрессионной модели показал, что точность прогноза снижается в периоды экстремальных температур и паводков, что требует дальнейшей развитии модели по сезонам года.

Таким образом, результаты исследования подтверждают, что биогенные элементы, поступающие в водохранилище, являются ключевым фактором эвтрофикации, а выявленная корреляционная зависимость может быть использована для оперативного прогнозирования состояния водоема при мониторинговых наблюдениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе пятилетнего гидрохимического мониторинга водохранилища Сестрорецкий Разлив установлено, что водоем находится в эвтрофном состоянии (средний ИТС = 8,04) с выраженной тенденцией к дальнейшей деградации качества воды.

Выявлена устойчивая прямая корреляционная связь (R = 0,789) между индексом загрязнения воды, рассчитываемым по биогенным элементам, и индексом трофического состояния. Полученное уравнение регрессии ИТС = 1,6839 × ИЗВ — 12,292 позволяет количественно оценивать влияние изменения биогенной нагрузки на трофический статус водоема.

Список литературы

1. Подлипенская Л. Е., Бакуменко Ю. С. Исследование процессов эвтрофикации и самоочищения водоемов // Экологический вестник Донбасса. 2021. № 1. URL: https://cyberleninka. ru/article/n/issledovanie-protsessov-evtrofikatsii-i-samoochischeniya-vodoemov (дата обращения: 11.08.2026).
2. Савкин В. М., Двуреченская С. Я. Влияние многолетнего комплексного использования водных ресурсов на экосистему Новосибирского водохранилища // Вода и экология: проблемы и решения. 2018. № 1 (73). URL: https://cyberleninka. ru/article/n/vliyanie-mnogoletnego-kompleksnogo-ispolzovaniya-vodnyh-resursov-na-ekosistemu-novosibirskogo-vodohranilischa (дата обращения: 01.09.2026).
3. Кашулин Н. А., Денисов Д. Б., Валькова С. А., Вандыш О. И., Терентьев П. М. Современные тенденции изменений пресноводных экосистем Евро-Арктического региона // Труды Кольского научного центра РАН. 2012. № 2. URL: https://cyberleninka. ru/article/n/sovremennye-tendentsii-izmeneniy-presnovodnyh-ekosistem-evro-arkticheskogo-regiona (дата обращения: 01.09.2026).
4. Нишонов Б. Эр., Саттарова Ф. Ю., Саидмахмудова Л. А., Бабажанова С. Ю. Оценка экологического состояния озер по гидробиологическим показателям // Universum: химия и биология. 2026. № 4 (142). URL: https://cyberleninka. ru/article/n/otsenka-ekologicheskogo-sostoyaniya-ozer-po-gidrobiologicheskim-pokazatelyam (дата обращения: 01.09.2026).
5. Шестеркин В. П. Фосфаты в воде малых рек юга Хабаровского края // Региональные проблемы. 2026. № 2. URL: https://cyberleninka. ru/article/n/fosfaty-v-vode-malyh-rek-yuga-habarovskogo-kraya (дата обращения: 21.08.2026).
6. Farizan A., Norfatimah M. Y., Aili Z. N., Lyena W. Z. A., Indah M. A. Use of cytological and molecular biological method for water pollution monitoring // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 674. Art. 012108. DOI: 10.1088/1755–1315/674/1/012108.
7. Barathan B. P., Chen W., Su Y. et al. The effects of nutrient loading from different sources on eutrophication in a large shallow lake in Southeast China. Environ Geochem Health 45, 7603–7620 (2023). https://doi. org/10.1007/s10653-023-01641-5 (дата обращения: 25.08.2026).
8. Zhang X., Yi Y., Yang Y., Liu H. & Yang Z. (2021). Modelling phosphorus loading to the largest shallow lake in northern China in different shared socioeconomic pathways. Journal of Cleaner Production, 297, 1–10. https://doi. org/10.1016/j.jclepro. 2021.12653.
9. Рекомендации Р 52.24.353–2012 «Отбор проб поверхностных вод суши и очищенных сточных вод» (утв. Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды 10 мая 2012 г.) (с изменениями и дополнениями).
10. Филатов Н. Н., Лукина Ю. Н., Галахина Н. Е., Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Молчанова Я. П. К вопросу оценки состояния и прогнозирования изменений системы «озеро — водосбор» как природного капитала // Труды КарНЦ РАН. 2025. № 6. URL: https://cyberleninka. ru/article/n/k-voprosu-otsenki-sostoyaniya-i-prognozirovaniya-izmeneniy-sistemy-ozero-vodosbor-kak-prirodnogo-kapitala (дата обращения: 02.09.2026).
11. Чуйкина Д. И. и др. Химический состав поверхностных вод в условиях антропогенной нагрузки (на примере малых водоемов Томского района). Вестник МГТУ. 2026. Т. 29, № 1. С. 75–89. DOI: https://doi. org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-75-89.
12. Постевая М. А., Даувальтер В. А., Слуковский З. И. Оценка качества вод городских озер по гидрохимическим индексам (на примере г. Мурманска) // Российский журнал прикладной экологии. 2025. № 1. URL: https://cyberleninka. ru/article/n/otsenka-kachestva-vod-gorodskih-ozer-po-gidrohimicheskim-indeksam-na-primere-g-murmanska (дата обращения: 01.09.2026).
13. Гржибовский А. М. Корреляционный анализ // Экология человека. 2008. № 9. URL: https://cyberleninka. ru/article/n/korrelyatsionnyy-analiz (дата обращения: 01.09.2026).

References

1. Podlipenskaya L. E. and Bakumenko Yu. S. (2021) 'Study of the processes of eutrophication and self-purification of water bodies', Ecological Bulletin of Donbass, (1). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/issledovanie-protsessov-evtrofikatsii-i-samoochischeniya-vodoemov (accessed: 11.08.2026).
2. Savkin V. M. and Dvurechenskaya S. Ya. (2018) 'The impact of long-term integrated use of water resources on the ecosystem of the Novosibirsk reservoir', Water and Ecology: Problems and Solutions, (1 (73)). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/vliyanie-mnogoletnego-kompleksnogo-ispolzovaniya-vodnyh-resursov-na-ekosistemu-novosibirskogo-vodohranilischa (accessed: 01.09.2026).
3. Kashulin N. A., Denisov D. B., Valkova S. A., Vandysh O. I. and Terentyev P. M. (2012) 'Current trends in changes of freshwater ecosystems of the Euro-Arctic region', Transactions of the Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, (2). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/

sovremennye-tendentsii-izmeneniy-presnovodnyh-ekosistem-evro-arkticheskogo-regiona (accessed: 01.09.2026).
4. Nishonov B. Er., Sattarova F. Yu., Saidmakhmudova L. A. and Babazhanova S. Yu. (2026) 'Assessment of the ecological state of lakes by hydrobiological indicators', Universum: Chemistry and Biology, (4 (142)). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/otsenka-ekologicheskogo-sostoyaniya-ozer-po-gidrobiologicheskim-pokazatelyam (accessed: 01.09.2026).
5. Shesterkin V. P. (2026) 'Phosphates in the water of small rivers of the south of Khabarovsk Krai', Regional Problems, (2). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/fosfaty-v-vode-malyh-rek-yuga-habarovskogo-kraya (accessed: 21.08.2026).
6. Farizan A., Norfatimah M. Y., Aili Z. N., Lyena W. Z. A. and Indah M. A. (2021) 'Use of cytological and molecular biological method for water pollution monitoring', IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 674, art. 012108. DOI: 10.1088/1755–1315/674/1/012108.
7. Barathan B. P., Chen, W., Su, Y. et al. (2023) 'The effects of nutrient loading from different sources on eutrophication in a large shallow lake in Southeast China', Environmental Geochemistry and Health, 45, pp. 7603–7620. https://doi. org/10.1007/s10653-023-01641-5 (accessed: 25.08.2026).
8. Zhang, X., Yi, Y., Yang, Y., Liu, H. and Yang, Z. (2021) 'Modelling phosphorus loading to the largest shallow lake in northern China in different shared socioeconomic pathways', Journal of Cleaner Production, 297, pp. 1–10. https://doi. org/10.1016/j. jclepro. 2021.12653.
9. Recommendations R 52.24.353–2012 'Sampling of surface land waters and treated wastewater' (approved by the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring on 10 May 2012) (with amendments and additions).
10. Filatov N. N., Lukina, Yu. N., Galakhina N. E., Kalinkina N. M., Tekanova E. V. and Molchanova Ya. P. (2025) 'On the issue of assessing the state and forecasting changes in the "lake — catchment" system as natural capital', Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences, (6). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/k-voprosu-otsenki-sostoyaniya-i-prognozirovaniya-izmeneniy-sistemy-ozero-vodosbor-kak-prirodnogo-kapitala (accessed: 02.09.2026).
11. Chuykina D. I. et al. (2026) 'Chemical composition of surface waters under anthropogenic load (on the example of small water bodies of the Tomsk region) ', Vestnik of MSTU, 29 (1), pp. 75–89. DOI: https://doi. org/10.21443/1560-9278-2026-29-1-75-89.
12. Postevaya M. A., Dauvalter V. A. and Slukovskiy Z. I. (2025) 'Assessment of water quality of urban lakes by hydrochemical indices (on the example of Murmansk) ', Russian Journal of Applied Ecology, (1). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/otsenka-kachestva-vod-gorodskih-ozer-po-gidrohimicheskim-indeksam-na-primere-g-murmanska (accessed: 01.09.2026).
13. Grzhibovskiy A. M. (2008) 'Correlation analysis', Human Ecology, (9). Available at: https://cyberleninka. ru/article/n/korrelyatsionnyy-analiz (accessed: 01.09.2026).

Информация об авторах

Алефирова Анастасия Александровна, *студентка, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; e-mail: anastasiaalefirova3@gmail.com.*

Антонов Иван Владимирович, *кандидат технических наук, доцент кафедры охраны окружающей среды и рационального использования природных ресурсов, Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна; 198095, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 4; SPIN-код: 5432–3424, Author ID: 652506, ORCID: 0000-0002-6737-5945; e-mail: signalsb@yandex.ru.*

Адылова Асель Жумагалиевна, *преподаватель Санкт-Петербургского Пожарно-спасательного колледжа «Санкт-Петербургский центр подготовки спасателей»; 193168, Россия, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 52, к. 1, лит. К; SPIN-код: 5468–7463, AuthorID: 1078480; e-mail: adylova97@mail.ru.*

Information about the authors

Alefirova Anastasia Aleksandrovna, *student, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; e-mail: anastasiaalefirova3@gmail.com.*

Antonov Ivan Vladimirovich, *PhD in Engineering, Associate Professor of the Department of Environmental Protection and Rational Use of Natural Resources, Higher School of Technology and Energy, Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design; 4 Ivan Chernykh Str., Saint Petersburg, 198095, Russia; SPIN-code: 5432–3424, Author ID (RSCI): 652506, ORCID: 0000-0002-6737-5945; e-mail: signalsb@yandex.ru.*

Adylova Asel Zhumagalievna, *Lecturer, Saint Petersburg State Budgetary Professional Educational Institution "Fire and Rescue College 'Saint Petersburg Center for Rescuer Training'"; 52, Bldg. 1, Lit. K Bolshevikov Ave., Saint Petersburg, 193168, Russia; SPIN-code: 5468–7463, Author ID (RSCI): 1078480; e-mail: adylova97@mail.ru.*