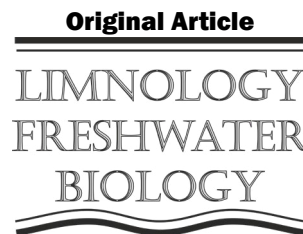


Assessment of Dissolved Heavy Metal Pollution and Ecological Risk in the Waters of Lake Kotokel (Eastern Cisbaikalia, Russia)



Shiretorova V.G.^{1*}, Nikitina E.P.¹, Bazarsadueva S.V.¹, Nimbueva N.B.^{1,2}, Budaeva O.D.¹, Taraskin V.V.¹, Pintaeva E.Ts.¹, Radnaeva L.D.^{1,2}, Garmaev E.Zh.¹

¹ Baikal Institute of Nature Management, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Sakhyanovoi st., 6, Ulan-Ude, 670047, Russia

² Banzarov Buryat State University, Smolina st., 24, Ulan-Ude, 670000, Russia

ABSTRACT. Safeguarding the ecological integrity of aquatic ecosystems is a national priority. Lake Kotokel, one of the largest lakes in the Baikal region, is hydrologically connected to Lake Baikal through a system of channels and holds considerable socio-economic significance. This study presents the first detailed seasonal analysis of dissolved heavy metal (HM) concentrations in the lake. Their relative abundance followed the order: Fe > Mn > Zn > Ni > Cr > Cu > Pb > Cd. Clear patterns of seasonal dynamics and spatial distribution were identified. The highest concentrations of manganese, zinc, and copper occurred during the under-ice period, driven by mobilization from silty bottom sediments and groundwater. In contrast, during the open-water period, elevated concentrations of iron, chromium, and nickel were associated with meltwater and rainfall inputs, which transport weathering products of rocks and soil organic matter from the watershed into the lake. To investigate the relationships between HM concentrations and water parameters—including physicochemical characteristics, nutrient levels, chlorophyll-*a* (chl-*a*), and total organic carbon (TOC)—Spearman correlation and principal component analyses (PCA) were applied. The results demonstrated that seasonal variations in physicochemical conditions and the intensity of biological processes exert a decisive influence on HM dynamics. For the first time, HM pollution and the associated ecological risk were assessed for Lake Kotokel. The pollution indices—Heavy Metal Evaluation Index (HEI), Nemerov Pollution Index (NPI), as well as Ecological Risk Index (ERI) indicated that HM pollution originates primarily from natural sources, with iron and manganese as the dominant contributors. However, the detection of cadmium in isolated samples near settlements elevated the potential ecological risk for aquatic organisms, underscoring the need for continuous monitoring of local pollution sources.

Keywords: Lake Kotokel, dissolved heavy metals, spatiotemporal distribution, pollution degree, ecological risk

For citation: Shiretorova V.G., Nikitina E.P., Bazarsadueva S.V., Nimbueva N.B., Budaeva O.D., Taraskin V.V., Pintaeva E. Ts., Radnaeva L.D., Garmaev E.Zh. Assessment of Dissolved Heavy Metal Pollution and Ecological Risk in the Waters of Lake Kotokel (Eastern Cisbaikalia, Russia) // *Limnology and Freshwater Biology*. 2025. - № 4. - P. 1062-1082. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-4-1062](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-4-1062)

1. Introduction

Freshwater ecosystems are increasingly threatened by anthropogenic pressures. The input and accumulation of diverse pollutants, compounded by climate change, pose significant risks to human health and aquatic biota (Salehi, 2022). Among these pollutants, HMs are of particular concern due to their toxicity, persistence, and capacity for bioaccumulation (Zamora-Ledezma et al., 2021). The extent of HM pollution in aquatic systems is shaped by regional, geographic, and climatic conditions. However, these factors collectively

generate comparable risks across regions, rendering HM pollution a global issue (Das, 2024; Wang et al., 2023; Şener et al., 2023; Dippong et al., 2024). Consequently, considerable research efforts have focused on evaluating HM pollution levels, tracing their sources and accumulation pathways in aquatic environments, and assessing the ecological consequences for ecosystems as well as potential health risks for humans (Botle et al., 2023; Hedayatzadeh et al., 2024; Jolaosho et al., 2024; Naz et al., 2022; Zhou et al., 2020; Yakovlev et al., 2023; Zhang et al., 2024; Argun, 2025; Bazarzhapov et al., 2023).

*Corresponding author.

E-mail address: vgshiretorova@mail.ru (V.G. Shiretorova)

Received: August 01, 2025; **Accepted:** August 26, 2025;

Available online: August 31, 2025

© Author(s) 2025. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Freshwater lakes, as integral components of surface water ecosystems, provide a wide range of essential services, including water supply, fisheries, flood regulation, and recreational opportunities. They also play a critical role in global biogeochemical cycles, particularly in regulating water, carbon, and nutrient dynamics (Fluet-Chouinard et al., 2017; Tanjung et al., 2024). Lake ecosystems are generally characterized by slow water exchange and lowland topographic settings, conditions that make them especially susceptible to pollutant accumulation (Bhateria and Jain, 2016). This vulnerability also heightens their sensitivity to environmental change and may pose significant risks to both biota and human health (Prasad et al., 2024; Ozdemir et al., 2024). The study of water quality in the aquatic systems of the Lake Baikal basin, together with the assessment of their ecological status under anthropogenic pressure and global climate change, is of particular importance. This is primarily due to Lake Baikal's designation as a UNESCO World Natural Heritage site and its status as a freshwater resource of global significance (Brown et al., 2021; Radnaeva et al., 2022; Pellinen et al., 2021).

Lake Kotokel (also referred to in the literature as Kotokelskoye, and less frequently as Katakel) is the largest lake on the eastern shore of Lake Baikal and the third largest water body in the Baikal basin (68.9 km²), following Lake Khubsugul (Mongolia) and Lake Gusinoye (Buryatia) (Fig. 1). The lake is located 2 km from Lake Baikal and is connected to it through a river system. The lake's water resources and chemical composition are strongly influenced by its location within the Baikal Rift Zone, a series of tectonically formed depressions characterized by fault waters discharging along fault

lines (Peryazeva et al., 2016). A sharp increase in recreational pressure during the 1980s and 1990s, combined with adverse natural conditions, led to a decline in its fisheries significance and ultimately caused an ecological crisis (Shagzhiev et al., 2017; Zengina and Bedrina, 2015). Between 2008 and 2009, the lake experienced an outbreak of Haff disease, resulting in its closure to recreational, drinking, and domestic use from June 2009 to May 2017 (The State..., 2022).

To investigate the causes of the Haff disease outbreak in 2008–2009, the first comprehensive ecobiological studies of Lake Kotokel were conducted (Pronin and Ubugunov, 2013). Subsequent studies, however, were often fragmentary, short-term, and narrowly focused (Vorobyevskaya et al., 2021; Zengina and Bedrina, 2015; Vorobyova et al., 2018; Bazarsadueva et al., 2023). Hydrogeochemical analyses of the lake revealed pronounced spatial variability in dissolved trace element concentrations, particularly in areas influenced by fault water discharge along the north-east fault zones (Angakhaeva et al., 2021). Previous studies have indicated that a combination of unfavorable factors—including substantial fluctuations in lake level, prolonged high temperatures during the growing season, and discharge from fault zones—can sharply degrade water quality and elevate the lake's trophic status (Shiretorova et al., 2025). Seasonal variations in water quality are particularly influenced by the concentrations of dissolved iron, manganese, zinc, and copper.

The present study aims to investigate the seasonal dynamics and spatial distribution of dissolved HMs in the surface waters of Lake Kotokel, and to evaluate the extent of HM pollution and the associated environmental risks.

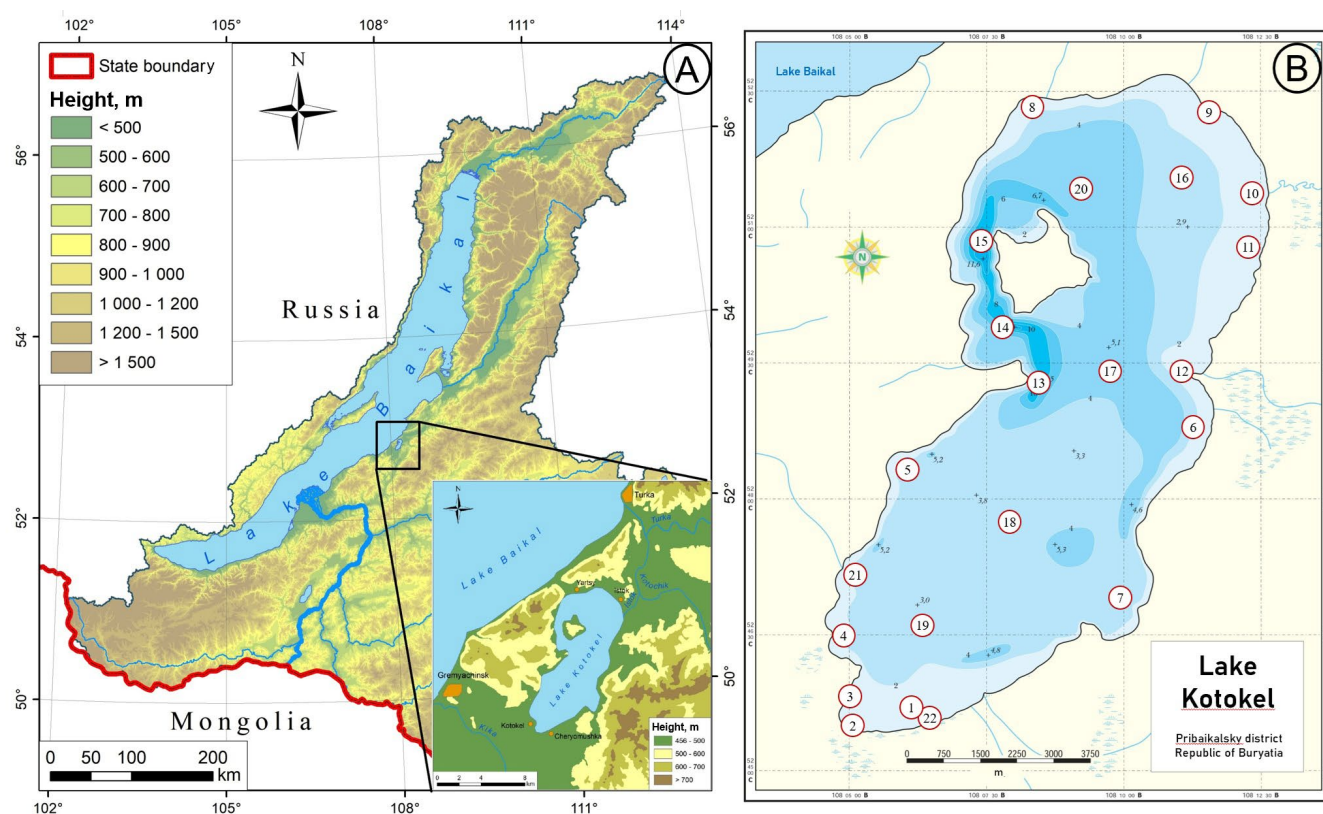


Fig.1. (A) Russian part of the Lake Baikal basin and the Lake Kotokel basin; (B) Sampling points within the Lake Kotokel water area.

2. Materials and methods

2.1. Study Area

The characteristics of Lake Kotokel, along with the geological features of the surrounding area and bottom sediments, have been described in detail in our previous work (Shiretorova et al., 2025).

The regional climate is continental, with cold winters and moderately warm summers. Mean January temperatures reach approximately -20°C , while July temperatures average around $+16^{\circ}\text{C}$. Annual precipitation is about 400 mm. Predominantly northwesterly winds over Lake Kotokel promote active water mixing, which results in substantial sediment deposition in the southern part of the lake (Pronin and Ubugunov, 2013).

Four settlements are located along the shoreline of Lake Kotokel—Yartsy, Istok, Kotokel, and Cheryomushka—with populations ranging from 70 to 145 residents. The main economic activities include tourism, fishing, and logging. The lake is also widely used for recreation. However, neither the settlements nor the tourist facilities are equipped with organized wastewater disposal systems.

2.2. Data Sources

This study used precipitation and mean monthly air temperature data from the Goryachinsk meteorological station (52.9842N, 108.3044E; 491 m a.s.l.), the closest station to the study area. The data are publicly available at: <https://www.pogodaiklimat.ru> (accessed on 02 July 2025).

2.3. Field Studies

Field studies were carried out from May 2024 to March 2025 to analyze the hydrochemical parameters of Lake Kotokel. Water samples were collected at sites of varying depth and near potential pollution sources, such as settlements and tourist facilities (Shiretorova et al., 2025). Sampling locations, marked on the bathymetric map (Bathymetry...), are shown in Fig. 1B. Samples were taken four times per year according to the season: under ice cover (late February–early March), spring (May), summer (July), and autumn (late September–early October). Surface water samples were collected throughout the lake at a depth of 0.2–0.5 m. In total, 86 samples were obtained.

The sampling procedure is described in detail in our previous work (Radnaeva et al., 2022). Briefly, water samples were collected in pre-rinsed polypropylene bottles and filtered through membrane filters with a pore size of $0.45\ \mu\text{m}$. For HM analysis, the filtered samples were preserved with ultrapure HNO_3 to adjust the pH to 2. Selected physicochemical parameters and components were analyzed directly in the field. Samples were transported to the institute's laboratory in refrigerated containers at $1\text{--}3^{\circ}\text{C}$ and analyzed within two days.

2.4. Laboratory Analyses

The methods of chemical analysis were described in detail in (Radnaeva et al., 2022; Shiretorova et al., 2025) and were performed at the Laboratory of

Chemistry of Natural Systems of BINM SB RAS according to standard procedures (GOST 57162-2016; GOST 17.1.3.07-82; GOST 17.1.4.02-90; Guidelines..., 2009).

Temperature, turbidity, pH value, dissolved oxygen (DO), electrical conductivity (Ec), and the content of phosphates, ammonium, nitrites, nitrates were measured in a field laboratory using additional equipment (pH tester, Hanna portable instruments (HI 991300, HI 98703, Hanna instruments, Judetul Salaj, Romania), photoelectric colorimeter (PE-5400 UV, Ecoskhem, Saint-Petersburg, Russia) on the day of sampling.

Water pH was measured by the potentiometric method, DO content by the Winkler test with an error 0.3%. Chl-*a* and biogenic elements concentrations were measured using spectrophotometric methods, with an error margin of 2–5%. Nitrite concentration was determined using the Griess reagent, nitrate—using the salicylic acid method, ammonium ions—by indophenol method, phosphates—by the Denige-Atkins method with tin chloride as a reducing agent. Total phosphorus (TP) content was determined after high temperature persulfate oxidation. TOC was determined using a TOC-L CSN analyzer (Shimadzu, Japan). Chl-*a* was extracted from phytoplankton cells using a 90% acetone prior to photometric determination. The concentrations of HMs (Fe, Mn, Zn, Ni, Cd, Cr, Cu, and Pb) were determined using an atomic absorption spectrometer (Solaar M6, Thermo Electron Corporation, USA) coupled with a electrothermal and flame atomizer, with an error of 5–10%.

2.5. Pollution and Ecological Risk Assessment

In this study, both pollution indices and indices for a preliminary assessment of ecological risk were calculated.

HEI assesses the concentration of HMs in water, reflects their cumulative impact, and evaluates water quality. It is defined as follows (Edet and Offiong, 2002):

$$\text{HEI} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{MAC}_i},$$

where C_i and MAC_i are the measured concentration and the maximum allowable concentration of the i -th metal, respectively. Water quality is classified based on the HEI values as low (<10), medium ($10\text{--}20$), or high (>20) pollution.

NPI is another metric for assessing water quality. It accounts for both the maximum and mean concentrations of each element and can indicate the contribution of major pollutants (Shetaia et al., 2023). The NPI is calculated as follows:

$$\text{NPI} = \sqrt{(\text{PI}_{\text{avg}}^2 + \text{PI}_{\text{max}}^2) / 2},$$

$$\text{PI} = C_i / \text{MAC}_i$$

where C_i is the measured concentration of HM in water, MAC_i is the maximum allowable concentration of the i -th metal. Based on NPI values, water quality is classified into five categories: unpolluted ($\text{NPI} \leq 0.7$), slightly polluted ($0.7 < \text{NPI} \leq 1$), moderately polluted ($1 < \text{NPI} \leq 2$), heavily polluted ($2 < \text{NPI} \leq 3$), and extremely polluted ($\text{NPI} > 3$) (Liu et al., 2021).

ERI is the overall ecological risk index for water based on HQ_i :

$$ERI = \sum_i^n (HQ_i \times T_i) / \sum_i^n T_i,$$

$$HQ_i = C_i / PNEC_i$$

where C_i is the measured concentration of the i -th HM in water, $PNEC_i$ is the predicted no-effect concentration to i -th metal. The PNEC values for Zn, Cr, Cu, Ni, Pb and Cd were calculated as described in (Shetaia et al., 2023), based on Criterion Continuous Concentration (CCC)—the maximum concentration of each substance in water to which aquatic organisms can be exposed indefinitely without adverse effects. CCC values for freshwater are available the U.S. Environmental Protection Agency (<https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-tables>).

As CCC values are not available for Fe and Mn, these elements were excluded from the ERI calculation. T_i is the toxic response factor of i -th metal, assigned as 1 for Zn, 2 for Cr, 5 for Cu, Ni, and Pb, and 30 for Cd (Shetaia et al., 2023).

ERI values are classified as follows: <1 ("no risk"), 1–5 ("low risk"), 5–10 ("moderate risk"), 10–15 ("considerable risk"), and >15 ("high risk") (Kumar et al., 2020).

2.6. Data Analysis and Visualization

Data on water component concentrations were analyzed using OriginPro software ver. 9.9 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA) and PAST ver. 4.16.

3. Results and Discussion

3.1. Water quality parameters

A distinctive feature of natural climate variations is the cyclicity of processes, with dry periods alternating with humid periods, and phases of high biological productivity followed by periods of decline. Lakes, particularly those with low water exchange or endorheic systems, can serve as sensitive indicators of regional climate change. The climate conditions during the study period, including mean monthly air temperatures (T) and precipitation (P) around Lake Kotokel, are presented in comparison with 25-year averages (T_{avg} and P_{avg}) from 2000 to 2024 (Fig. 2). In 2024, air temperatures in July and August were 2.8–2.9 °C above long-term averages, while precipitation was twice the long-term average in June and approximately 25% below the average in July. These summer conditions enhanced nutrient input from the watershed at the start of the growing season and promoted warming of the lake water, resulting in a phytoplankton bloom in July and August 2024 and associated changes in water quality parameters. In contrast, higher-than-average air temperatures from November 2024 to January 2025 had minimal impact on water parameters due to the presence of an established ice cover.

To examine the relationship between dissolved HMs concentrations, water physicochemical characteristics, and the intensity of biological processes, a com-

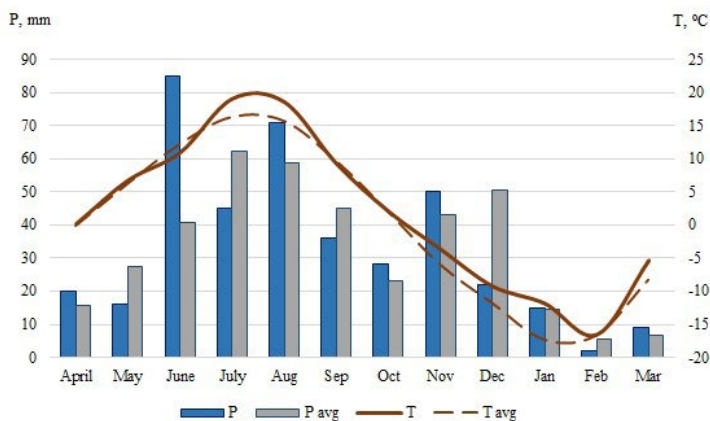


Fig. 2. Air temperature (T) and precipitation (P) according to data from the meteorological station in Goryachinsk settlement.

prehensive analysis of water quality parameters was performed. The results of the chemical analysis of Lake Kotokel water (86 samples) are presented in Table 1.

The seasonal dynamics of physicochemical parameters of water and nutrient concentrations in Lake Kotokel, derived from long-term monitoring, have been described in detail previously (Shiretorova et al., 2025).

Notably, summer conditions in 2024 were particularly favorable for a phytoplankton bloom. Lake water temperatures in July reached 26.5–27.4 °C, stimulating high biological activity. The bloom outbreak was accompanied by increased turbidity (95–120 NTU), pH (8.5–10.8), DO concentrations (10.6–16.4 mg/L), and chl- a levels (38–186 µg/L, with isolated sites reaching 311–586 µg/L).

Exceedances of MACs for fishery water bodies (Table 1) were most frequent for pH during the bloom period (59.5% of samples), less frequent for TP in the autumn period (2.4% of samples), and for ammonium nitrogen in May, associated with inflow of contaminated meltwater from surrounding areas (1.2% of samples). DO fell below the normative threshold of 4 mg/L in 1.2% of samples during the under-ice period. Regarding turbidity, only 12% of samples—exclusively from the under-ice period—complied with WHO standards.

3.2. Spatiotemporal distribution of HMs in the lake water

According to the data obtained (Table 1), the concentrations of dissolved HMs in Lake Kotokel during the study period can be ranked in descending order as follows: Fe > Mn > Zn > Ni > Cr > Cu > Pb > Cd. Spatial distributions of HM concentrations across different seasons are shown in Fig. 3. High spatial variation was observed throughout the lake. During the under-ice period, the greatest variability occurred for manganese and zinc. In the open-water period, the variability persisted despite active wind-induced mixing. Elevated iron concentrations were consistently observed in the southern part of the lake (sampling points 1–4, 19, 22), and manganese concentrations were particularly high in winter (points 1, 4). Previous studies have reported

Table 1. Water characteristics of Lake Kotokel.

Parameters ¹	Min	Max	Mean	Median	Std. Deviation	WHO Standard, 2017 ²	Russian National Standard (MAC) ³	% of Samples Exceeding MAC
T	0.1	27.4	14	14.6	9.1	- ⁴	-	-
Turbidity	1.94	120	28.89	26.65	22.5	5	-	-
pH	5.9	10.8	7.9	7.3	1.5	6.5-8.5	6.5-8.5	59.5
Ec	53	85.8	66	66	7.4	≤ 1500	-	-
DO	3.0	16.4	10.4	10.6	2.4	≥ 5.0	≥ 4-6	1.2
NO ₂ -N	0.001	0.006	0.002	0.002	0.001	-	0.02	0
NO ₃ -N	0.04	0.73	0.20	0.11	0.19	50	9.1	0
NH ₄ ⁺ -N	nd ⁵	0.49	0.06	0.03	0.09	1.5	0.4	1.2
PO ₄ ³⁻ -P	nd	0.03	0.007	0.004	0.006	-	0.2	0
TP	0.02	0.36	0.08	0.08	0.05	-	0.2	2.4
TOC	2.9	11.3	7.3	6.8	2	-	-	-
Chl- <i>a</i>	1.6	587	71	34	89	-	-	-
Fe	20	224	81	68	44	300	100	26.2
Mn	0.2	177	10.0	2.0	22.1	100	10	21.4
Zn	nd	11.81	3.26	2.37	2.66	3000	10	2.4
Cu	nd	1.69	0.48	0.43	0.30	2000	1	4.8
Ni	nd	23.98	0.66	< 0.01	3.21	70	5	2.4
Cr	nd	14.15	0.53	0.31	1.53	50	70	0
Pb	nd	0.42	0.01	< 0.02	0.05	10	10	-
Cd	nd	0.16	0.01	< 0.005	0.03	3	6	0

Note: ¹ T in °C, turbidity in NTU, Ec in µS/cm, other components—in mg/L, Chl-*a* and metals – in µg/L; ² (World..., 2017); ³ maximum allowable concentration (Order..., 2016); ⁴ «—» indicates that a standard was not established; ⁵ nd – below detection limit (detection limit, µg/L: Cr, Pb = 0.02, Ni = 0.01, Zn, Cd = 0.005).

strong sediment transport in this area due to prevailing northwesterly winds (Pronin and Ubugunov, 2013), leading to the accumulation of organic matter and subsequent mobilization of metals into the water column.

A pronounced local increase in copper, chromium, and nickel concentrations was observed in July at sampling point 14, located in the deepest part of the lake, likely associated with input from fracture-vein waters. The locations of the presumed northeast-trending fault zones were previously mapped in (Angakhaeva et al. 2021). Near these zones, fluctuations in metal concentrations of varying intensity were more frequent during the study period, occasionally reaching 1–2 orders of magnitude. Lead and cadmium were detected in isolated samples (3.5% and 8.1% of samples, respectively) in coastal areas near settlements and recreational facilities, at concentrations well below MAC standards. Exceedances of MACs were most frequent for Fe and Mn (26% and 21% of samples, respectively), while Zn, Cu, and Ni exceeded standards less frequently (2.4–4.8% of samples). The maximum degree of exceedance was highest for Mn (17.7 times the standard), followed by Ni (4.4), Fe (2.2), Cu (1.7), and Zn (1.2).

The seasonal dynamics of metal concentrations in Lake Kotokel are presented in Figure 4. A pronounced increase during the under-ice period was observed for Mn (several-fold), Zn, and Cu. This winter rise is likely

related to changes in physicochemical conditions—specifically, decreased pH and DO—which promote mobilization of these metals from sediments and groundwater. Similar seasonal patterns have been reported for lakes in the Selenga River delta (Chebykin et al., 2012). Dissolved iron exhibited two annual peaks—in spring and autumn—likely reflecting inputs with organic matter from upper soil horizons via meltwater or rainfall. Chromium concentrations peaked in spring, declined thereafter, and rose slightly in autumn. Nickel was primarily detected in summer, while in other seasons its concentrations generally remained below the detection limit. The lowest concentrations of iron, chromium, and nickel occurred during the ice-covered period, likely reflecting their predominant input from bedrock weathering and surface soil horizons in the watershed.

Radar charts were constructed based on correlation analysis of water composition data to illustrate statistically significant relationships ($p < 0.05$) between individual metals and physicochemical parameters, as well as nutrient concentrations (Fig. 5). Lead and cadmium were excluded from the analysis because their concentrations were below the detection limit in most samples. Moderate positive correlations were observed for Mn–Zn (0.61), Mn–Cu (0.53), and Zn–Cu (0.46), whereas Mn–Cr exhibited a moderate negative correlation (-0.41). The generally low correlation coefficients

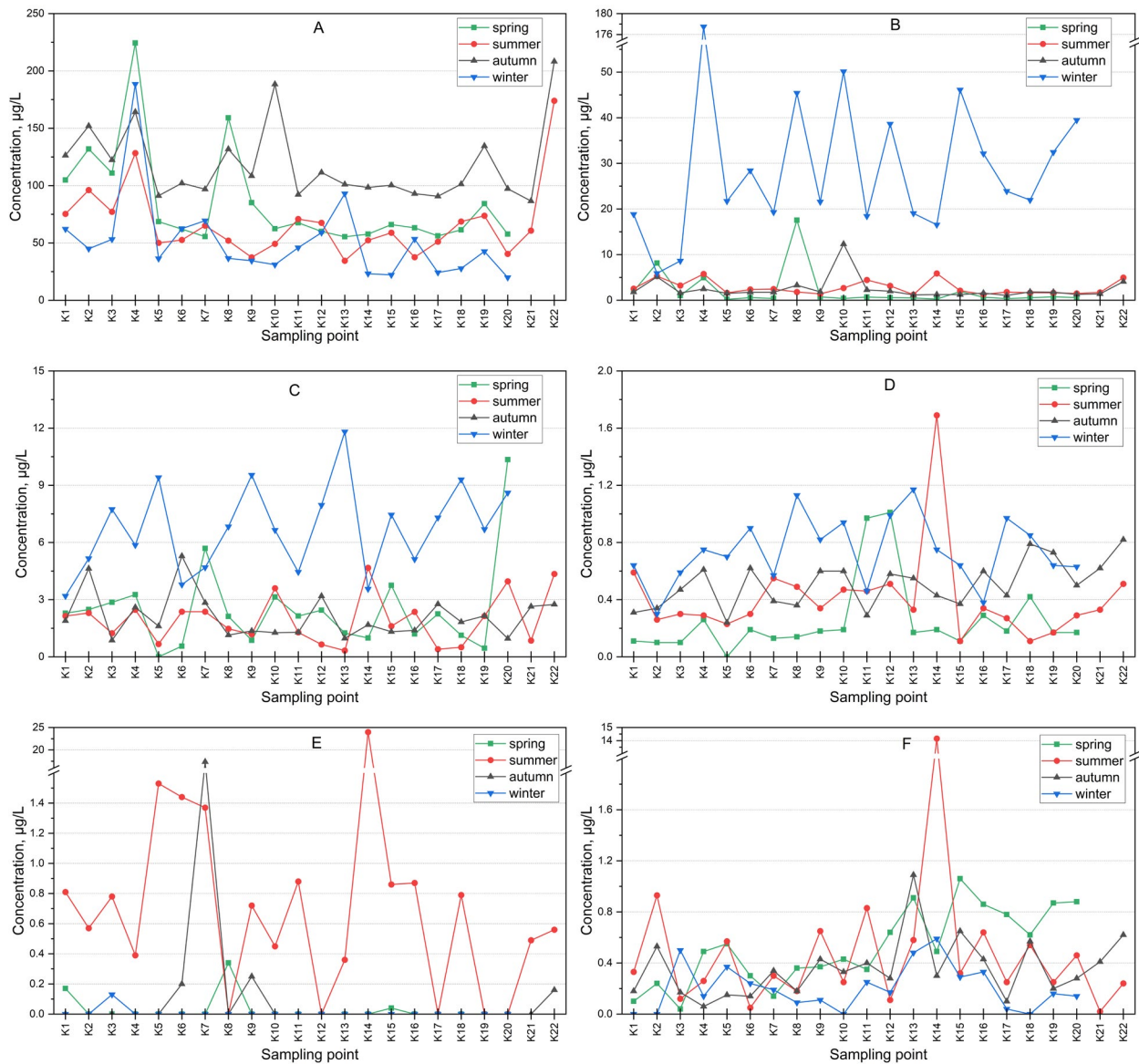


Fig.3. Spatiotemporal dynamics of Fe (A), Mn (B), Zn (C), Cu (D), Ni (E), and Cr (F) in the water of Lake Kotokel. Sampling point numbers correspond to those shown in Fig. 1B.

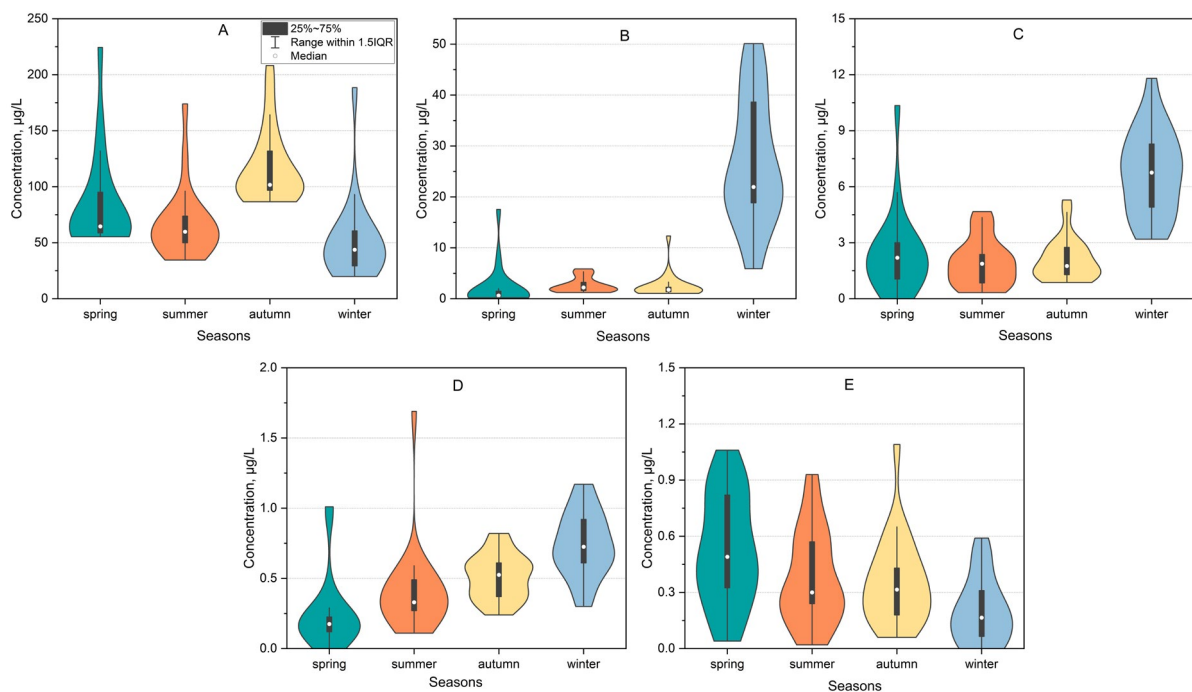


Fig.4. Seasonal dynamics of Fe (A), Mn (B), Zn (C), Cu (D), and Cr (E) in the water of Lake Kotokel.

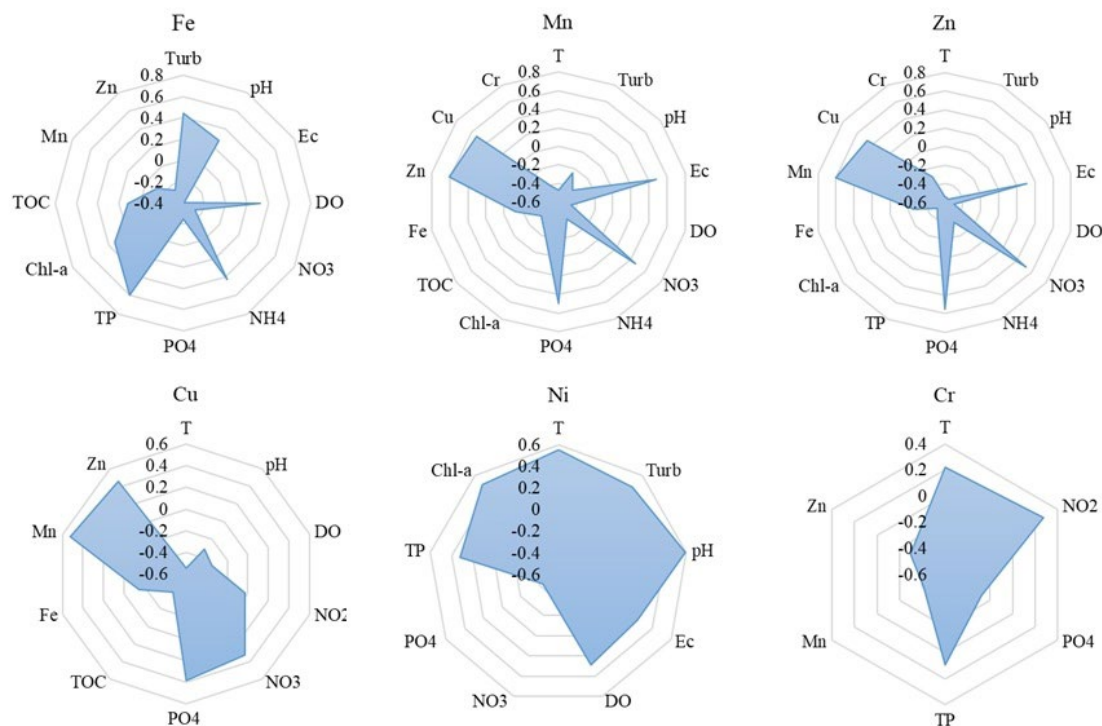


Fig.5. Radar chart of significant correlations (Spearman correlation coefficient, $p > 0.05$) between metal concentrations, physicochemical parameters, and nutrients contents in Lake Kotokel water.

may reflect the influence of different sources (natural/anthropogenic) and diverse pathways of metal input in Lake Kotokel, including surface runoff from surrounding areas, groundwater inflow, and mobilization from sediments.

Stronger positive correlations of certain metals with physicochemical parameters and nutrients were also observed. In particular, iron exhibited correlations with TP (0.60), turbidity (0.44), and ammonium nitrogen (0.43), suggesting inputs from surrounding areas along with organic matter via runoff from meltwater and rainfall. Manganese concentrations, which increased during the winter period, consistently showed negative correlations with pH (−0.40), temperature (−0.48), and DO (−0.46), and positive correlations with EC (0.48) and nutrients—nitrate nitrogen (0.47) and phosphate phosphorus (0.49)—reflecting its release during organic matter decomposition under ice cover.

Zinc exhibited a behavior similar to manganese, showing comparable correlations with environmental parameters and nutrients, along with negative correlations with total suspended solids (−0.42) and chl-a (−0.50). Nickel was positively correlated with temperature (0.55), turbidity (0.46), pH (0.59), and chl-a (0.49), consistent with its highest concentrations occurring in summer when these parameters reach their maxima.

Figure 6 presents PCA plots for the first three components. The PCA identified three main components with eigenvalues greater than 1, which together explained 63.01 % of the total variance. Sample grouping occurred primarily by season rather than by sampling location, indicating that seasonal variations in physicochemical conditions and the intensity of biological processes strongly influence the input, accumulation, and potential adsorption or desorption of dissolved HMs in lake water.

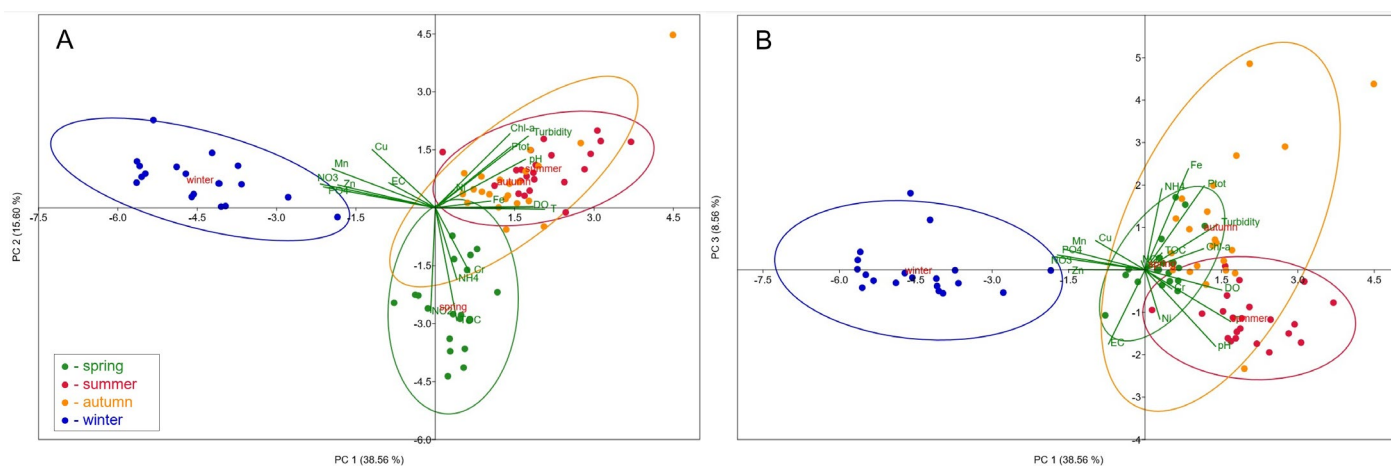


Fig.6. PCA of water quality parameters and HM concentrations in Lake Kotokel. (A) - biplot PC1-PC2, (B) - biplot PC1-PC3.

The first principal component PC1 (38.56 %) exhibited the highest loadings on water physicochemical parameters (excluding Ec), TP, and chl-*a*, separating under-ice (winter) and open-water (summer and autumn) periods. Electrical conductivity, Mn, Zn, and Cu—highest in winter samples—were negatively correlated with temperature, turbidity, pH, TP, chl-*a*, and Fe, which increased during the open-water period. PC2 (15.50 %) highlighted a cluster of spring samples with elevated TOC, ammonium nitrogen, and Cr and Ni concentrations. PC3 (8.56 %), with the highest loadings on Fe and TP, distinguished summer and autumn samples.

3.3. Pollution and ecological risk assessment

The level of metal pollution in Lake Kotokel and its potential impact on aquatic flora and fauna were assessed using HEI, NPI, and ERI indices.

HEI values ranged from 0.71 to 20.97, with a mean of 2.54. Water samples from nearly all sampling points were classified as "low pollution". The only exception was a sample collected during the under-ice period near the "Geser" tourist base (sampling point 4), which was classified as "moderate pollution" primarily due to elevated Mn concentrations. Seasonally, higher HEI values were observed during the winter period (Table 2).

Unlike HEI, NPI index exhibited greater gradation in pollution levels, as it accounts for both the maximum and average concentrations of individual metals, thereby highlighting the contribution of major pollutants (Li et al., 2022). During the spring and summer periods, lake water was generally classified as "unpolluted" in open-water areas and "slightly polluted" in coastal zones. In autumn, pollution levels ranged from "slightly polluted" to "moderately polluted," primarily due to elevated Fe concentrations. NPI values, similar to HEI, peaked during the under-ice period; according to the classification criteria, water during this period was predominantly "moderately polluted" to "heavily polluted". Notably, during the open-water period, Fe contributed most to the NPI value, likely entering the lake through runoff and precipitation from surrounding areas. During the ice-covered period, the contribution of Mn increased sharply, reflecting its release from silty bottom sediments.

ERI values were generally below 1, with a mean of 0.34, indicating no significant risk to aquatic organisms in almost all seasons. Only six samples (five collected in spring and one in winter) fell into the "low

risk" category due to the presence of Cd near settlements and tourist bases, with ERI values not exceeding 3.43.

Overall, the results of HEI, NPI, and ERI calculations indicate that pollution of Lake Kotokel waters by the studied HMs is predominantly of natural origin. Nevertheless, occasionally elevated ERI values underscore the need for continuous monitoring of local pollution sources.

4. Conclusions

The first detailed investigation of dissolved HMs in Lake Kotokel revealed distinct features of their seasonal dynamics and spatial distribution. High variability in metal concentrations was observed across the lake, more pronounced during the under-ice period for Mn and Zn, and largely season-independent for Fe, Cu, Cr, and Ni. Localized peaks in metal concentrations, in some cases exceeding background levels by 1–2 orders of magnitude, were likely driven by fracture water discharge. Seasonally, the highest concentrations of Mn, Zn, and Cu occurred during the under-ice period, whereas Fe, Cr and Ni were more abundant in the open-water season. These patterns likely reflect differences in geochemical behavior and sources of input: the former group is primarily mobilized in winter from bottom sediments (under reduced DO conditions) and from groundwater, while the latter group is introduced during the open-water period via meltwater and rainfall transporting weathering products of rocks and soil organic matter from the watershed. Correlation and PCA analyses revealed that seasonal changes in physicochemical conditions and the intensity of biological processes exert a decisive influence on HM concentrations. The relatively low correlation coefficients may indirectly reflect the presence of multiple sources (natural or anthropogenic) and pathways of input—including surface runoff, groundwater inflow, and mobilization from bottom sediments—of dissolved HMs in Lake Kotokel.

For the first time, the current level of HM pollution and the associated ecological risk in Lake Kotokel were assessed. The pollution levels increased progressively from spring (classified as "unpolluted" in open-water areas and "slightly polluted" in coastal zones) to autumn ("moderately polluted") and winter ("heavily polluted"). During the open-water period, Fe contributed most to the pollution indices, whereas in the under-ice period, Mn played a dominant role. In most cases, ERI values indicated no risk to aquatic

Table 2. Water evaluation indices in different seasons.

Seasons	HEI			NPI			ERI		
	min	max	$\bar{x}$	min	max	$\bar{x}$	min	max	$\bar{x}$
Spring	0.71	3.77	1.58	0.40	1.61	0.66	0.00	3.43	0.62
Summer	0.91	8.26	1.89	0.26	3.47	0.63	0.05	0.89	0.17
Autumn	1.47	5.30	2.32	0.63	2.50	0.94	0.09	0.32	0.19
Winter	1.86	20.97	4.55	0.45	12.69	1.94	0.11	1.97	0.39

organisms across all seasons. Overall, the pollution and ecological risk assessment suggest that HM pollution in Lake Kotokel is primarily of natural origin. However, isolated cases where ERI values increased from "no risk" to "low risk" underscore the need for continuous monitoring of local pollution sources.

The collected data provide new insights into the mechanisms of metal input and accumulation under the combined influence of natural and anthropogenic factors in the context of climate change. These findings are also relevant for water quality management in comparable hydrological systems and for developing strategies to mitigate the transfer of metals into Lake Baikal.

Acknowledgements

This research was supported by the Russian Science Foundation (Grant No. 24-17-00333, <https://rscf.ru/project/24-17-00333>)

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Angakhaeva N.A., Plyusnin A.M., Ukraintsev A.U. et al. 2021. Hydrogeochemical features of Lake Kotokel. *Earth Sciences and Subsoil Use* 44(2): 106–115. DOI: [10.21285/2686-9993-2021-44-2-106-115](https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-106-115)
- Argun Y.A. 2025. Examination of heavy metal concentrations and their interaction with anthropogenic sources in Ermenek Dam Lake (Turquoise Lake). *Environmental Geochemistry and Health* 47: 58. DOI: [10.1007/s10653-025-02367-2](https://doi.org/10.1007/s10653-025-02367-2)
- Bathymetry of Natural Lakes in Russia. MapGraphica. URL: http://lakemaps.org/ru/atlas_maps.asp?name=Buryatia&geotype=rp&local=Республика%20Бурятия (accessed on 02 November 2024).
- Bazarsadueva S.V., Taraskin V.V., Budaeva O.D. et al. 2023. First Data on PAE levels in Surface Water in Lakes of the Eastern Coast of Baikal. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20(2): 1173. DOI: [10.3390/ijerph20021173](https://doi.org/10.3390/ijerph20021173)
- Bazarchapov T.Z., Shiretorova V.G., Radnaeva L.D. et al. 2023. Distribution of heavy metals in water and bottom sediments in the basin of lake Gusinoe (Russia): Ecological risk assessment. *Water* 15(19): 3385. DOI: [10.3390/w15193385](https://doi.org/10.3390/w15193385)
- Bhateria R., Jain D. 2016. Water Quality Assessment of Lake Water: a Review. *Sustainable Water Resources Management* 2: 161–173. DOI: [10.1007/s40899-015-0014-7](https://doi.org/10.1007/s40899-015-0014-7)
- Botle A., Salgaonkar S., Tiwari R. et al. 2023. Brief status of contamination in surface water of rivers of India by heavy metals: a review with pollution indices and health risk assessment. *Environmental Geochemistry and Health* 45(6): 2779–2801. DOI: [10.1007/s10653-022-01463-x](https://doi.org/10.1007/s10653-022-01463-x)
- Brown K.P., Gerber A., Bedulina D. et al. 2021. Human impact and ecosystemic health at Lake Baikal. *WIREs Water* 8(4): e1528. DOI: [10.1002/wat2.1528](https://doi.org/10.1002/wat2.1528)
- Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V. et al. 2012. Current state of the Selenga River waters in the Russian territory concerning major components and trace elements. *Sustainable Chemistry for the Environment* 20: 561–580.
- Das S. 2024. Assessment of the ecotoxicity of heavy metal contaminants on aquatic organisms: A review on the impact of Lead, Chromium, Cadmium, Zinc and Mercury. *African Journal of Biological Sciences* 6(5): 8871–8883. DOI: [10.48047/AFJBS.6.5.2024.8871-8883](https://doi.org/10.48047/AFJBS.6.5.2024.8871-8883)
- Dippong T., Senila M., Cadar O. et al. 2024. Assessment of the heavy metal pollution degree and potential health risk implications in lakes and fish from northern Romania. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 12(2): 112217. DOI: [10.1016/j.jece.2024.112217](https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112217)
- Edet A.E., Offiong O.E. 2002. Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo-Odukpani area, Lower Cross River Basin (southeastern Nigeria). *GeoJournal* 57(4): 295–304. DOI: [10.1023/B:GEJO.0000007250.92458.de](https://doi.org/10.1023/B:GEJO.0000007250.92458.de)
- Fluet-Chouinard E., Messenger M.L., Lehner B. et al. 2017. Freshwater Lakes and Reservoirs. In: Finlayson C., Milton G., Prentice R. et al. (Eds.), *The Wetland Book II: Distribution, description, and conservation*. Springer, pp. 125–142. DOI: [10.1007/978-94-007-6173-5_201-2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6173-5_201-2)
- GOST 17.1.3.07-82. 1982. Nature conservation. The hydrosphere. Rules for water quality control of reservoirs and watercourses. The interstate standard. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012472> (in Russian)
- GOST 17.1.4.02-90. 1999. Water. Spectrophotometric Determination of Chlorophyll *a*. The interstate standard. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009756> (in Russian)
- GOST 57162-2016. 2016. Water. Determination of elements content by graphite furnace atomic absorption spectrometry. National standard of Russian Federation. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140389> (in Russian)
- Guidelines for the chemical analysis of land surface waters. Part I. 2009. Rostov-on-Don: Nauka-Obrazovanie-Kul'tura.
- Hedayatzadeh F., Ildoromi A., Hassanzadeh N. et al. 2024. Comprehensive monitoring of contamination and ecological-health risk assessment of potentially harmful elements in surface water of Maroon-Jarahi sub-basin of the Persian Gulf, Iran. *Environmental Geochemistry and Health* 46(10): 411. DOI: [10.1007/s10653-024-02181-2](https://doi.org/10.1007/s10653-024-02181-2)
- Jolaosho T.L., Elegbede I.O., Ndimele P.E. et al. 2024. Occurrence, distribution, source apportionment, ecological and health risk assessment of heavy metals in water, sediment, fish and prawn from Ojo River in Lagos, Nigeria. *Environmental Monitoring and Assessment* 196(2): 109. DOI: [10.1007/s10661-023-12148-y](https://doi.org/10.1007/s10661-023-12148-y)
- Kumar S.B., Padhi R.K., Mohanty A.K. et al. 2020. Distribution and ecological- and health-risk assessment of heavy metals in the seawater of the southeast coast of India. *Marine Pollution Bulletin* 161(Pt A):111712. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2020.111712](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111712)
- Li L., Wu J., Lu J. et al. 2022. Water quality evaluation and ecological-health risk assessment on trace elements in surface water of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 241: 113775. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2022.113775](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113775)
- Liu X., Chen S., Yan X. et al. 2021. Evaluation of potential ecological risks in potential toxic elements contaminated agricultural soils: Correlations between soil contamination and polymetallic mining activity. *Journal of Environmental Management* 300: 113679. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.113679](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113679)
- Naz S., Mansouri B., Chatha A.M. et al. 2022. Water quality and health risk assessment of trace elements in surface water at Punjnad Headworks, Punjab, Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research* 29(40): 61457–61469. DOI: [10.1007/s11356-022-20210-4](https://doi.org/10.1007/s11356-022-20210-4)
- Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of December 13, 2016 No. 552 (as amended on October 12, 2018). 2016. On Approval of Water Quality Standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (in Russian)

- Ozdemir K., Ciner M.N., Ozcan H.K. et al. 2024. Evaluation of Water and Sediment Quality in Lake Mogan, Türkiye. *Water* 16(11): 1546. DOI: [10.3390/w16111546](https://doi.org/10.3390/w16111546)
- Pellinen V., Cherkashina T., Gustaytis M. 2021. Assessment of metal pollution and subsequent ecological risk in the coastal zone of the Olkhon Island, Lake Baikal, Russia. *Science of The Total Environment* 786: 147441. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.147441](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147441)
- Peryazeva E.G., Plyusnin A.M., Garmaeva S.Z. et al. 2016. Peculiarities of the formation of the chemical composition of water in lakes on the eastern shore of Lake Baikal. *Geography and Natural Resources* 5: 49–59. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2016-5\(49-59\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-5(49-59)) (in Russian)
- Prasad S., Wei Y., Chaminda T. et al. 2024. Spatiotemporal Assessment of Water Pollution for Beira Lake, Sri Lanka. *Water* 16(11): 1616. DOI: [10.3390/w16111616](https://doi.org/10.3390/w16111616)
- Pronin N.M., Ubugunov L.L. 2013. Lake Kotokel'skoe: natural conditions, biota, ecology. Ulan-Ude: Buryat Scientific Center SB RAS.
- Radnaeva L.D., Bazarzhapov T.Z., Shiretorova V.G. et al. 2022. Ecological State of Lake Gusinoe–A Cooling Pond of the Gusinozersk GRES. *Water* 14(1): 4. DOI: [10.3390/w14010004](https://doi.org/10.3390/w14010004)
- Salehi M. 2022. Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis. *Environmental International* 158: 106936. DOI: [10.1016/j.envint.2021.106936](https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106936)
- Şener E., Şener Ş., Bulut C. 2023. Assessment of heavy metal pollution and quality in lake water and sediment by various index methods and GIS: A case study in Beyşehir Lake, Turkey. *Marine Pollution Bulletin* 192(1–2): 115101. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2023.115101](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115101)
- Shagzhiev K.Sh., Babikov V.A., Zhigmitova S.B. et al. 2017. The East Coast of Baikal as an Area of Attraction and Influx of Tourists from Siberia, Mongolia and China. *Nature of Inner Asia* 1(2): 54–76. DOI: [10.18101/2542-0623-2017-1-54-76](https://doi.org/10.18101/2542-0623-2017-1-54-76)
- Shetaia S.A., Nasr R.A., Lasheen E.S.R. et al. 2023. Assessment of heavy metals contamination of sediments and surface waters of Bitter lake, Suez Canal, Egypt: Ecological risks and human health. *Marine Pollution Bulletin* 192: 115096. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2023.115096](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115096)
- Shiretorova V.G., Nikitina E.P., Bazarsadueva S.V. et al. 2025. Current State of Lake Kotokel (Eastern Cisbaikalia, Russia): Hydrochemical Characteristics, Water Quality, and Trophic Status. *Water* 17(4): 545. DOI: [10.3390/w17040545](https://doi.org/10.3390/w17040545)
- Tanjung R.H.R., Indrayani E., Agamawan L.P.I. et al. 2024. Water quality assessment to determine the trophic state and suitability of Lake Sentani (Indonesia) for various utilisation purposes. *Water Cycle* 5: 99–108. DOI: [10.1016/j.watcyc.2024.02.006](https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2024.02.006)
- The State of Lake Baikal and Measures for Its Protection; Report; Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation: Moscow, Russia. 2022. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_ozera_baykal_i_merakh_po_ego_okhrane (accessed on 02 July 2025).
- Vorobyevskaya E.L., Sedova N.B., Chevel K.A. et al. 2021. Biogenic Elements and Water Quality of Lake Kotokel and Some Neighboring Reservoirs. In *Ecological and biological systems [Ecological Studies, Hazards, Solutions]* 27: 54–62. (in Russian)
- Vorobyova I.B., Belozertseva I.A., Vlasova N.V. et al. 2018. Current state of watercourses in the estuarine areas of the eastern coast of Lake Baikal. *Advances in current natural science* 1: 86–92. DOI: [10.17513/use.36656](https://doi.org/10.17513/use.36656)
- Wang C., Wang K., Zhou W. et al. 2023. Occurrence, Risk, and Source of Heavy Metals in Lake Water Columns and Sediment Cores in Jiangnan Plain, Central China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20(4): 3676. DOI: [10.3390/ijerph20043676](https://doi.org/10.3390/ijerph20043676)
- World Health Organization (WHO). 2017. Guidelines for Drinking Water Quality 4th edition, incorporating the 1st addendum; WHO: Geneva, Switzerland.
- Yakovlev E., Druzhinin S., Druzhinina A. et al. 2023. Trace metals in surface water of the Pechora River and its tributaries: Content, water quality and risks assessment (Arctic Ocean basin). *Marine Pollution Bulletin* 194(Pt B): 115317. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2023.115317](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115317)
- Zamora-Ledezma C., Negrete-Bolagay D., Figueroa F. et al. 2021. Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology & Innovation* 22: 101504. DOI: [10.1016/j.eti.2021.101504](https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101504)
- Zengina T.Yu., Bedrinova D.S. 2015. Study of the quality of surface water in the recreational zone of Lake Kotokel (Republic of Buryatia) Bulletin of the Belarusian State University. Episode 2: Chemistry. Biology. Geography 2: 63–69. (in Russian)
- Zhang Z., Lou S., Liu S. et al. 2024. Potential risk assessment and occurrence characteristic of heavy metals based on artificial neural network model along the Yangtze River Estuary, China. *Environmental Science and Pollution Research* 31(22): 32091–32110. DOI: [10.1007/s11356-024-33400-z](https://doi.org/10.1007/s11356-024-33400-z)
- Zhou Q., Yang N., Li Y. et al. 2020. Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017. *Global Ecology and Conservation* 22: e00925. DOI: [10.1016/j.gecco.2020.e00925](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00925)

Растворенные тяжелые металлы в воде оз. Котокель (Восточное Прибайкалье, Россия): оценка уровня загрязнения и экологического риска



Ширеторова В.Г.^{1*}, Никитина Е.П.¹, Базарсадуева С.В.¹, Нимбуева Н.Б.^{1,2},
Будаева О.Д.¹, Тараскин В.В.¹, Пинтаева Е.Ц.¹, Раднаева Л.Д.^{1,2}, Гармаев Е.Ж.¹

¹ Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Сахьяновой, 6, Улан-Удэ, 670047, Россия

² Бурятский государственный университет имени Доржи Банзарова, ул. Смолина, 24а, Улан-Удэ, 670000, Россия

АННОТАЦИЯ. Сохранение экологического благополучия водных экосистем является приоритетной задачей государства. Озеро Котокель - одно из крупнейших озер Байкальского региона, связанное с оз. Байкал через систему проток, и имеющее большое социально-экономическое значение. Впервые проведен детальный анализ содержания растворенных тяжелых металлов, значения которых могут быть ранжированы в следующем порядке: Fe > Mn > Zn > Ni > Cr > Cu > Pb > Cd, установлены особенности их сезонной динамики и пространственного распределения. Для марганца, цинка и меди наибольшие содержания были характерны в подледный период, что обусловлено их мобилизацией из илистых отложений и подземных вод. В период открытой воды возрастали содержания железа, хрома и никеля, вследствие их поступления с талыми и дождевыми водами, несущими в водоем продукты выветривания горных пород и органическое вещество почв с водосбора. Для выявления взаимосвязей между содержанием тяжелых металлов и такими параметрами воды, как физико-химические показатели, содержание биогенных веществ, общего органического углерода и хлорофилла-а, были выполнены корреляционный анализ Спирмена и анализ методом главных компонент. Показано определяющее влияние сезонных изменений физико-химических условий и интенсивности развития биологических процессов на содержание тяжелых металлов. Впервые для оз. Котокель проведена оценка степени загрязнения воды тяжелыми металлами и связанного экологического риска. Значения индексов загрязненности (NEI and NPI) и экологического риска (ERI) свидетельствуют о природных источниках загрязнения тяжелыми металлами, преимущественно железом и марганцем. Однако обнаруженный в единичных пробах воды вблизи поселений кадмий повышал уровень потенциального экологического риска для водных организмов, что указывает на необходимость постоянного контроля за локальными источниками загрязнения.

Ключевые слова: озеро Котокель, растворенные тяжелые металлы, пространственно-временное распределение, степень загрязнения, экологический риск

Для цитирования: Ширеторова В.Г., Никитина Е.П., Базарсадуева С.В., Нимбуева Н.Б., Будаева О.Д., Тараскин В.В., Пинтаева Е.Ц., Раднаева Л.Д., Гармаев Е.Ж. Растворенные тяжелые металлы в воде оз. Котокель (Восточное Прибайкалье, Россия): оценка уровня загрязнения и экологического риска // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 1062-1082. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-1062

1. Введение

Пресноводные экосистемы сталкиваются с серьезными экологическими угрозами из-за растущего антропогенного воздействия. Поступление и накопление в водоемах различных поллютантов в условиях изменения климата создают опасность для здоровья человека и благополучия биоты (Salehi, 2022). Тяжелые металлы вследствие своей токсич-

ности, стойкости и способности к биоаккумуляции относятся к приоритетным загрязнителям водных экосистем (Zamora-Ledezma et al., 2021). На загрязнение водных объектов тяжелыми металлами оказывают влияние региональные, географические и климатические факторы, что, тем не менее, создает аналогичные риски и является глобальной проблемой (Das, 2024; Wang et al., 2023; Erhan Şener et al., 2023; Thomas Dippong et al., 2024). Исследователями

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: vgshiretorova@mail.ru (В.Г. Ширеторова)

Поступила: 01 августа 2025; **Принята:** 26 августа 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

© Автор(ы) 2025. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



всего мира уделяется большое внимание изучению степени загрязнения ТМ, определению источников их поступления и особенностей накопления в водных объектах, а также оценке связанного экологического риска для водных экосистем и риска для здоровья человека (Bottle et al., 2023; Hedayatzadeh et al., 2024; Jolaosho et al., 2024; Naz et al., 2022; Qiaoqiao Zhou et al., 2020; Yakovlev et al., 2023; Zhang et al., 2024; Argun, 2025 Bazarzharov et al., 2023).

Пресные озёра, являясь неотъемлемой составляющей ресурсов поверхностных вод, обеспечивают широкий спектр жизненно важных услуг, включая водоснабжение, рыболовство, регулирование паводков и рекреационные возможности. Они также играют важнейшую роль в глобальных биогеохимических циклах, в частности, в регулировании циклов воды, углерода и питательных веществ (Fluet-Chouinard et al., 2017; Tanjung et al., 2024). Озерные экосистемы, как правило, характеризуются замедленным водообменом и расположением в понижениях рельефа, что делает их особенно восприимчивыми к накоплению загрязняющих веществ (Bhateria and Jain, 2016). Это повышает их чувствительность к изменениям окружающей среды и может представлять значительный риск как для биоты, так и для здоровья человека (Prasad et al., 2024; Ozdemir et al., 2024). Исследование качества воды в водных объектах бассейна озера Байкал, а также оценка их экологического состояния в условиях антропогенного воздействия и глобальных изменений климата, является особенно важным, поскольку Байкал является объектом Всемирного природного наследия и источником пресной воды мирового значения (Brown et al., 2021; Radnaeva et al., 2022; Pellinen et al., 2021).

Озеро Котокель (в литературе Котокельское, реже Катакель) – самое крупное из озер восточного побережья оз. Байкал и третье по площади (площадь поверхности 68,9 км²) после озер Хубсугул (Монголия) и Гусиное (Бурятия) в бассейне оз. Байкал (Рис. 1). Озеро расположено в 2 км от оз. Байкал и имеет связь с ним через систему рек. На формирование ресурсов и химического состава озерных вод значительное влияние оказывает его расположение в Байкальской рифтовой зоне - в цепочке котловин тектонического происхождения, сопровождающееся разгрузкой трещинно-жильных вод по разрывным нарушениям (Перязева и др., 2016). Резко возросшая в 80-90-х гг. XX в. рекреационная нагрузка на водоем в сочетании с неблагоприятными природными факторами привели к потере рыбохозяйственного значения, а затем и к экологической катастрофе (Шагжиев и др., 2017; Зенгина и Бедринова, 2015). В 2008-2009 гг. озеро пережило вспышку Гаффской болезни. С июня 2009 г. по май 2017 г. на озере действовал запрет на его использование в рекреационных, питьевых и хозяйственно-бытовых целях (Государственный..., 2022).

С целью выяснения причин появления Гаффской болезни в 2008-2009 гг. были проведены первые комплексные эколого-биологические исследования озера (Пронин и Убугунов, 2013). Проводившиеся в последующие годы исследования носили фрагментарный, кратковременный и часто узконаправленный характер (Воробьевская и др., 2021; Зенгина и Бедринова, 2015; Воробьева и др., 2018; Bazarsadueva et al., 2023). Исследование гидрогеохимических особенностей озера Котокель показало высокую неоднородность содержания растворенных микроэлементов в зонах разгрузки тре-

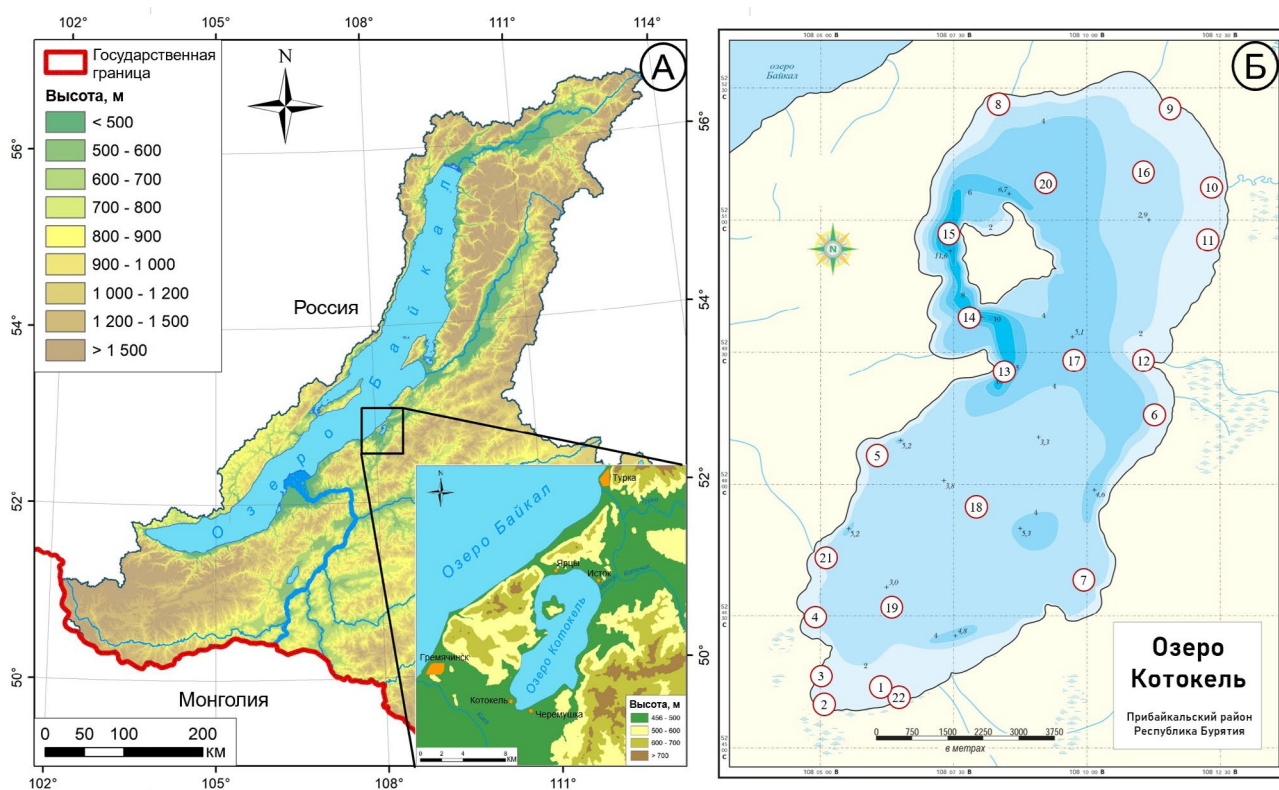


Рис.1. А – Российская часть бассейна оз. Байкал и бассейн оз. Котокель. В – Точки отбора проб в акватории оз. Котокель.

щинно-жилых вод в пределах разрывных нарушений северо-восточного простирания (Ангахаева и др., 2021). Ранее нами на основе анализа многолетних данных с использованием российских (УКИЗВ, ПАНБ) и международных (NSF-WQI, CCME-WQI) индексов комплексной оценки качества воды было показано, что сочетание неблагоприятных факторов, таких как значительные флуктуации уровня озера, длительные высокие температуры в вегетационный период, а также разгрузка трещинно-жилых вод приводят к резкому снижению качества воды и повышению трофности озера (Shiretorova et al., 2025). Был отмечен вклад растворенных железа, марганца, цинка и меди в снижение общего качества воды в отдельные сезоны.

Цель исследования – анализ особенностей сезонной динамики и пространственного распределения растворенных форм ТМ в поверхностной воде оз. Котокель на основе детальных сезонных исследований, оценка степени загрязненности вод ТМ и связанного экологического риска.

2. Материалы и методы

2.1. Описание района исследования

Характеристика озера, геологическая характеристика района и донных отложений были подробно описаны нами ранее в работе (Shiretorova et al., 2025).

Климат территории континентальный с холодной зимой и умеренно теплым летом. Средняя температура января около -20°C , в июле воздух прогревается до $+16^{\circ}\text{C}$. Суммарное годовое количество осадков составляет приблизительно 400 мм. На оз. Котокель преобладают ветры северо-западного направления, вследствие чего в южной части озера сильны наносные явления (Пронин и Убугунов, 2013).

На побережье оз. Котокель расположены 4 поселения: Ярцы, Исток, Котокель и Черемушка, численность населения в которых составляет от 70 до 145 человек. Основные виды деятельности: рыболовство, туризм и лесозаготовка. Озеро Котокель широко используется в рекреационных целях. Организованное водоотведение в населенных пунктах и на базах отдыха отсутствует.

2.2. Источники данных

В работе использованы данные по количеству осадков и среднемесячным температурам воздуха, измеренные ближайшей к району исследования метеостанцией в пос. Горячинск (52.9842 с.ш., 108.3044 в.д., высота над уровнем моря 491 м), находящиеся в свободном доступе на онлайн-ресурсе: <https://www.pogodaiklimat.ru> (доступ от 02 июля 2025).

2.3. Отбор проб

Полевые исследования проводились с мая 2024 года по март 2025 года для анализа гидрохи-

мических параметров озера Котокель. Пробы воды отбирались на участках с различной глубиной и вблизи потенциальных источников загрязнения, таких как населённые пункты и туристические объекты (Shiretorova et al., 2025). Точки отбора проб, обозначенные на батиметрической карте (Батиметрия...), представлены на Рис. 1Б. Пробы отбирались четыре раза в зависимости от сезона: в период ледостава (конец февраля – начало марта), весной (май), летом (июль) и осенью (конец сентября – начало октября). Пробы поверхностных вод отбирались по всей акватории озера на глубине 0,2–0,5 м. Всего было отобрано 86 проб.

Процедура отбора проб подробно описана в нашей предыдущей работе (Radnaeva et al., 2022). Вкратце, пробы воды собирали в предварительно промытые полипропиленовые бутылки и фильтровали через мембранные фильтры с размером пор 0,45 мкм. Для анализа на содержание тяжёлых металлов отфильтрованные пробы консервировали добавлением сверхчистой HNO_3 до $\text{pH} \leq 2$. Некоторые физико-химические параметры и компоненты анализировали непосредственно на месте отбора. Пробы доставляли в лабораторию института в холодильном контейнере с температурой $1-3^{\circ}\text{C}$ и анализировали в течение двух дней.

2.4. Химический анализ

Методы химического анализа были подробно описаны в работах (Radnaeva et al., 2022; Shiretorova et al., 2025). Анализ выполнялся в Лаборатории химии природных систем БИП СО РАН по стандартным методикам (ГОСТ 57162-2016; ГОСТ 17.1.3.07-82; ГОСТ 17.1.4.02-90; Руководство..., 2009). Температура (Т), мутность, значение pH, растворенный кислород (РК), электропроводность (Ес), а также содержание фосфатов, аммония, нитритов, нитратов измерялись в полевой лаборатории с использованием специального оборудования (pH-тестер, портативные приборы Hanna (HI 991300, HI 98703, Hanna instruments, Judetul Salaj, Румыния), фотозлектрический колориметр (ПЭ-5400 UV, Экросхим, Санкт-Петербург, Россия) в день отбора проб.

Значения pH воды измеряли потенциометрическим методом, содержание РК – по Винклеру с погрешностью 0,3%. Концентрацию хлорофилла-а (Chl-a) и биогенных элементов определяли спектрофотометрическим методом с погрешностью 2–5%. Содержание нитритов определяли с помощью реактива Грисса, нитратов – с салициловокислым натрием, аммонийного азота – индофенольным методом, фосфатов – методом Дениже-Аткинса с хлористым оловом в качестве восстановителя. Содержание общего фосфора ($\text{P}_{\text{общ}}$) определяли после высокотемпературного персульфатного окисления. Содержание общего органического углерода (ООУ) определяли с использованием анализатора TOC-L CSN (Shimadzu, Япония). Хлорофилл-а экстрагировали из клеток фитопланктона 90%-ным раствором ацетона перед фотометрическим определением. Концентрации тяжёлых металлов в воде

(Fe, Mn, Zn, Ni, Cd, Cr, Cu и Pb) определяли с использованием атомно-абсорбционного спектрометра (Solaar M6, США), оснащенного электротермическим и пламенным атомизаторами, с погрешностью 5–10%.

2.5. Оценка степени загрязнения и экологического риска

В исследовании были рассчитаны как индексы загрязнения, так и индексы предварительной оценки экологического риска.

Индекс оценки содержания тяжелых металлов (Heavy metal evaluation index (HEI)) оценивает содержание ТМ в воде, отражает кумулятивное воздействие ТМ и качество воды, и определяется следующим образом (Edet and Offiong, 2002):

$$HEI = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{MAC_i},$$

где C_i и MAC_i – контролируемое значение и предельно допустимая концентрация i -го металла соответственно. Качество воды в соответствии со значениями индекса оценивается как низкого ($HEI < 10$), среднего (HEI от 10 до 20) и высокого уровня загрязнения ($HEI > 20$).

Индекс загрязнения Немерова (Nemerow pollution index (NPI)) также применяется для оценки качества воды. Он учитывает максимальные и средние значения каждого элемента и может указывать на вклад основных загрязняющих веществ (Shetaia et al., 2023). NPI рассчитывается следующим образом:

$$NPI = \sqrt{(PI_{avg}^2 + PI_{max}^2) / 2},$$

$$PI = C_i / MAC_i$$

где C_i – содержание металла в воде, MAC_i – предельно допустимая концентрация. В соответствии со значением NPI вода классифицируется по пяти классам: незагрязнённая ($NPI \leq 0,7$), слабозагрязнённая ($0,7 < NPI \leq 1$), умеренно загрязнённая ($1 < NPI \leq 2$), сильно загрязнённая ($2 < NPI \leq 3$), чрезвычайно загрязнённая ($NPI > 3$) (Liu et al., 2021).

Оценка экологического риска (Ecological risk assessment (ERI)) основана на расчете суммарного индекса экологического риска для воды, учитывающего коэффициенты опасности каждого металла (HQ_i):

$$ERI = \sum_i^n (HQ_i \times T_i) / \sum_i^n T_i,$$

$$HQ_i = C_i / PNEC_i$$

где C_i — содержание металла в воде, $PNEC_i$ — прогнозируемая безопасная концентрация для i -го металла. $PNEC$ для Zn, Cr, Cu, Ni, Pb и Cd были рассчитаны как описано в (Shetaia et al., 2023) с использованием значений максимальной концентрации вещества в воде, воздействию которой водные организмы могут подвергаться неограниченно долго без вредных последствий (Criterion continuous concentration (CCC)) для пресной воды (<https://www.epa.gov/wqc/national-recommended-water-quality-criteria-tables>). Значения CCC недоступны для Fe и Mn, поэтому они исключены из

расчета ERI. T_i — фактор токсического отклика i -го металла, который был принят за 1 для Zn, 2 для Cr, 5 для Cu, Ni и Pb и 30 для Cd (Shetaia et al., 2023). Значения ERI в интервалах < 1 , 1–5, 5–10, 10–15 и более 15 классифицируются, соответственно, как «риск отсутствует», «низкий риск», «умеренный риск», «значительный риск» и «высокий риск» (Kumar et al., 2020).

2.6. Анализ и визуализация данных

Для статистической обработки, анализа и визуализации полученных данных были использованы пакеты программ OriginPro software ver. 9.9 (OriginLab Corporation, Northampton, MA, USA) и PAST 4.16.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Параметры качества воды

Характерной чертой естественных изменений климата выступает цикличность процессов: засушливые периоды чередуются с увлажненными, а фазы интенсивного роста биопродуктивности сменяются периодами её снижения. При этом озёра, особенно те, что имеют слабую проточность или являются бессточными, способны выступать в роли индикаторов климатических изменений в регионах своего расположения.

Характеристика климатических условий в период исследования, включающая среднемесячные температуры воздуха (T) в районе оз. Котокель и количество осадков (P), в сравнении со средними значениями (T_{avg} and P_{avg}) за последние 25 лет (2000–2024 гг.) представлена на Рис. 2. Можно отметить, что температура воздуха в июле и августе 2024 г. была на 2.8–2.9 °C выше средних значений, а количество осадков было в два раза больше среднего в июне и на четверть ниже в июле. Такие погодные условия в летний период способствовали поступлению питательных веществ с водосбора в начале вегетационного периода и последующему хорошему прогреву озерной воды, что привело к вспышке массового развития фитопланктона, наблюдавшейся в июле и августе, и соответствующим изменениям

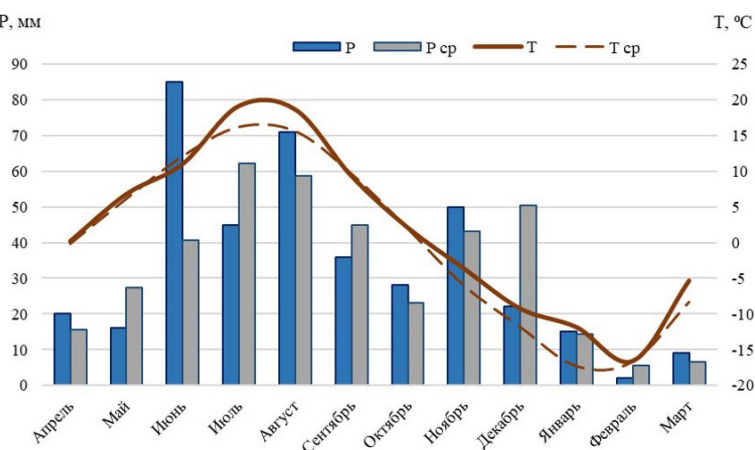


Рис.2. Температура воздуха (T) и количество осадков (P) по данным метеостанции в пос. Горячинск.

параметров качества воды. Более высокие в сравнении со среднемноголетними температуры воздуха в период с ноября 2024 г. по январь 2025 г. вследствие установившегося ледяного покрова уже такого значимого влияния на параметры воды не оказали.

Для выявления взаимосвязи содержания растворенных ТМ с физико-химическими характеристиками воды и интенсивностью биологических процессов был выполнен комплексный анализ параметров качества воды. Результаты химического анализа воды оз. Котокель (86 образцов) представлены в Таблице 1.

Сезонная динамика по данным многолетних исследований физико-химических параметров воды и биогенных веществ в воде оз. Котокель была подробно описана нами ранее (Shiretorova et al., 2025). Можно отметить, что погодные условия в летний период 2024 г. были наиболее благоприятными для массового развития фитопланктона. Температура озерной воды в июле достигала 26,5-27,4°C, что обусловило высокую интенсивность биологических процессов. Вспышка массового цветения сопровождалась повышением мутности до 95-120 NTU, pH – до 8,5-10,8, содержания растворенного кислорода – до 10,6-16,4 мг/л, хлорофилла-а – до 38-186 мкг/л (на отдельных участках 311-586 мкг/л).

Превышения ПДК для рыбохозяйственных водоемов (Таблица 1) по параметрам качества воды наиболее часто наблюдались для pH в период массового цветения водоема (59,5% образцов), реже – для общего фосфора в осенний период (2,4% образцов), для аммонийного азота – в мае при поступлении загрязненных талых вод с прилегающих территорий (1,2% образцов). Содержание растворенного кислорода падало до значений ниже норматива 4 мг/л в подледный период в 1,2% образцов. По показателю мутности лишь 12% образцов, причем только в подледный период, соответствовали стандартам ВОЗ.

3.2. Пространственно-временное распределение тяжелых металлов в воде

Согласно полученным данным (Таблица 1) концентрации растворенных ТМ в оз. Котокель в период исследования в порядке убывания можно расположить следующим образом: Fe > Mn > Zn > Ni > Cr > Cu > Pb > Cd. На Рис. 3 представлено пространственное распределение содержания ТМ в озерной воде в различные сезоны. Можно отметить высокую неравномерность содержаний металлов по акватории. В подледный период наибольший разброс концентраций был характерен

Таблица 1. Результаты химического анализа воды оз. Котокель

Параметр ¹	Мин.	Макс.	Среднее	Медиана	Стандартное отклонение	Стандарт ВОЗ, 2017 ²	ПДК ³	% образцов, превышающих ПДК
Т	0,1	27,4	14	14,6	9,1	- ⁴	-	-
Мутность	1,94	120	28,89	26,65	22,5	5	-	-
pH	5,9	10,8	7,9	7,3	1,5	6,5-8,5	6,5-8,5	59,5
Ес	53	85,8	66	66	7,4	≤ 1500	-	-
РК	3,0	16,4	10,4	10,6	2,4	≥ 5,0	≥ 4–6	1,2
NO ₂ ⁻ -N	0,001	0,006	0,002	0,002	0,001	-	0,02	0
NO ₃ ⁻ -N	0,04	0,73	0,20	0,11	0,19	50	9,1	0
NH ₄ ⁺ -N	н.о. ⁵	0,49	0,06	0,03	0,09	1,5	0,4	1,2
PO ₄ ³⁻ -P	н.о.	0,03	0,007	0,004	0,006	-	0,2	0
Робщ	0,02	0,36	0,08	0,08	0,05	-	0,2	2,4
ООУ	2,9	11,3	7,3	6,8	2	-	-	-
Chl-a	1,6	587	71	34	89	-	-	-
Fe	20	224	81	68	44	300	100	26,2
Mn	0,2	177	10,0	2,0	22,1	100	10	21,4
Zn	н.о.	11,81	3,26	2,37	2,66	3000	10	2,4
Cu	н.о.	1,69	0,48	0,43	0,30	2000	1	4,8
Ni	н.о.	23,98	0,66	< 0,01	3,21	70	5	2,4
Cr	н.о.	14,15	0,53	0,31	1,53	50	50	0
Pb	н.о.	0,42	0,01	< 0,02	0,05	10	10	-
Cd	н.о.	0,16	0,01	< 0,005	0,03	3	6	0

Примечание: ¹ Т в °C, мутность - в NTU, Ес – в µS/cm, другие компоненты – в мг/л, Chl-a и металлы – в мкг/л; ² (World..., 2017); ³ предельно допустимая концентрация для водных объектов рыбохозяйственного значения (Приказ..., 2016); ⁴ «-» не установлено; ⁵ н.о. – ниже предела обнаружения (предел обнаружения, мкг/л: Cr, Pb = 0,02; Ni = 0,01; Zn, Cd = 0,005).

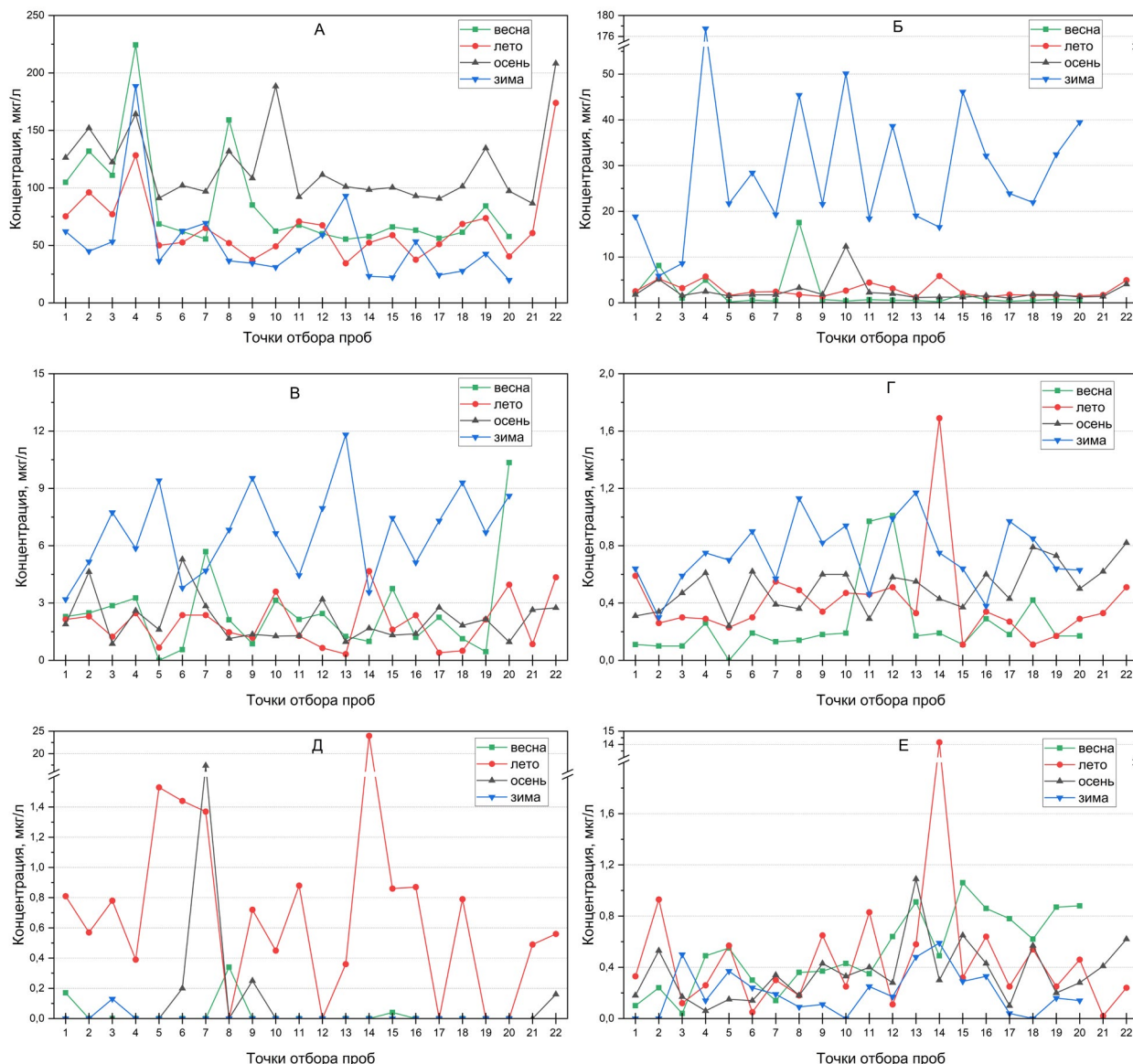


Рис.3. Пространственно-временная динамика содержания в воде оз. Котокель Fe (А), Mn (Б), Zn (В), Cu (Г), Ni (Д) and Cr (Е). Нумерация точек отбора приведена согласно рис. 1Б.

для марганца и цинка по всей акватории. В период открытой воды, несмотря на активное ветровое перемешивание, неоднородность содержаний ТМ сохранялась. Для южной части озера в течение всего года наблюдались повышенные концентрации железа (точки 1-4, 19, 22), зимой – марганца (точки 1, 4). Ранее отмечалось, что для этой части озера вследствие преобладания ветров северо-западного направления сильны наносные явления (Пронин и Убугунов, 2013), что приводит к скоплению здесь органического вещества и последующей мобилизации металлов в водную толщу. Можно отметить локальное резкое повышение содержаний меди, хрома и никеля в июле в точке 14, находящейся в районе максимальных глубин озера, что может быть связано с поступлением этих металлов с трещинно-жильными водами. Расположение предполагаемых разрывных нарушений северо-восточного простирания ранее было показано в работе (Ангахаева и др., 2021). Вблизи этих зон в период исследования чаще наблюдались колебания концентраций металлов различной степени выраженности, достигающие иногда 1-2 порядков. Свинец

и кадмий были обнаружены в единичных образцах (в 3,5% и 8,1% образцов, соответственно) в прибрежных зонах вблизи населенных пунктов и баз отдыха в количествах значительно меньше норм ПДК. Превышение нормативов ПДК наблюдалось наиболее часто для Fe и Mn (в 26 и 21% образцов, соответственно), для Zn, Cu и Ni реже – в 2,4-4,8% проб. При этом максимальная кратность превышения норматива была для наибольшей для Mn – 17,7 раз, для остальных металлов ниже: Ni – 4,4, Fe – 2,2, Cu – 1,7, Zn – 1,2.

Анализ сезонной динамики содержания металлов в воде оз. Котокель представлен на Рис. 4. Выраженное повышение концентраций в подледный период характерно для марганца (в несколько раз), цинка и меди. Рост концентраций этих металлов зимой может быть связан с изменением физико-химических условий – снижением pH и содержания растворенного кислорода, что способствует их мобилизации из илистых отложений и подземных вод. Аналогичная динамика данных элементов ранее была отмечена для озер дельты р. Селенги (Чебыкин и др., 2012). В содержании растворенного

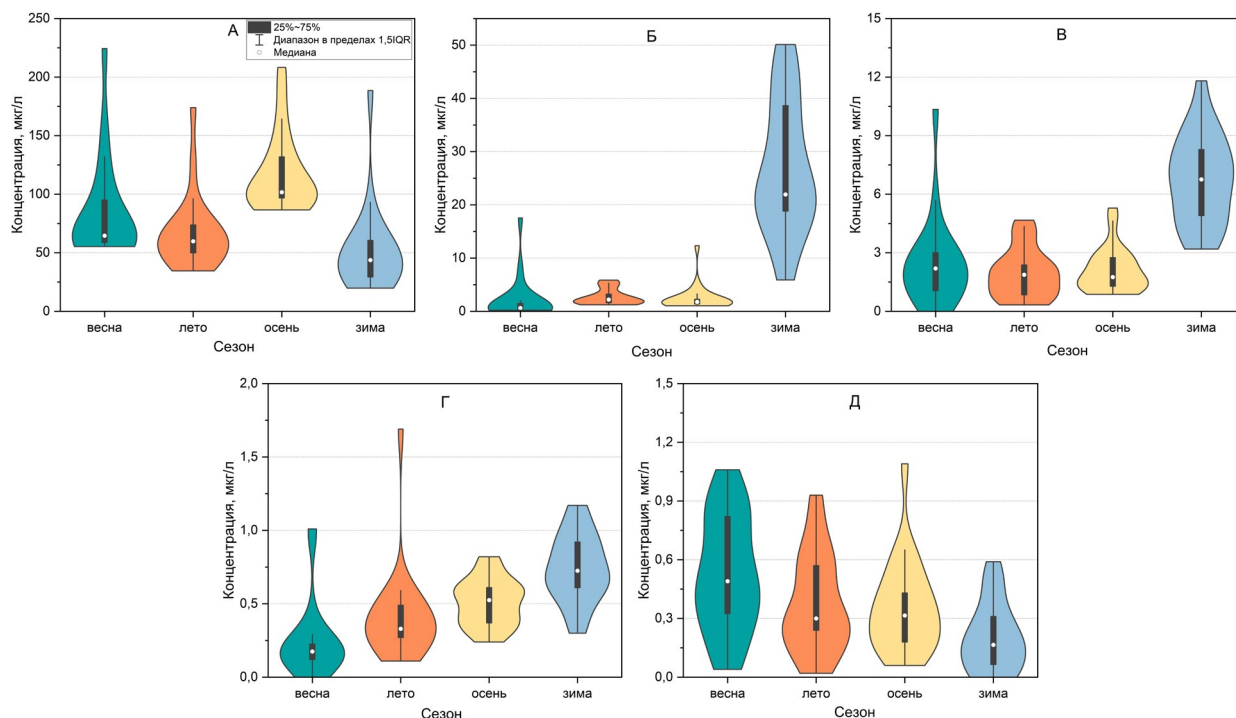


Рис.4. Сезонная динамика содержаний Fe (А), Mn (Б), Zn (В), Cu (Г) и Cr (Д) в воде оз. Котокель.

железа в течение года наблюдалось два максимума – весной и осенью, что вероятно, обусловлено его поступлением с органическим веществом верхних почвенных горизонтов с талыми или дождевыми водами. Для хрома было характерно максимальное содержание в озерной воде весной, затем оно снижалось и незначительно повышалось осенью. Никель обнаруживался в воде оз. Котокель преимущественно в летнее время, в остальные сезоны его содержание было чаще всего ниже предела обнаружения. Минимальные концентрации железа, хрома

и никеля наблюдались в подледный период, что, вероятно, может быть связано с преимущественным их поступлением при выветривании горных пород и из поверхностных горизонтов почв водосбора.

По результатам корреляционного анализа данных состава воды были построены круговые диаграммы, отражающие статистически значимые связи ($p < 0,05$) между отдельными металлами и физико-химическими показателями и содержанием биогенов (Рис. 5). Из анализа были исключены свинец и кадмий, так как в большинстве проб их содер-

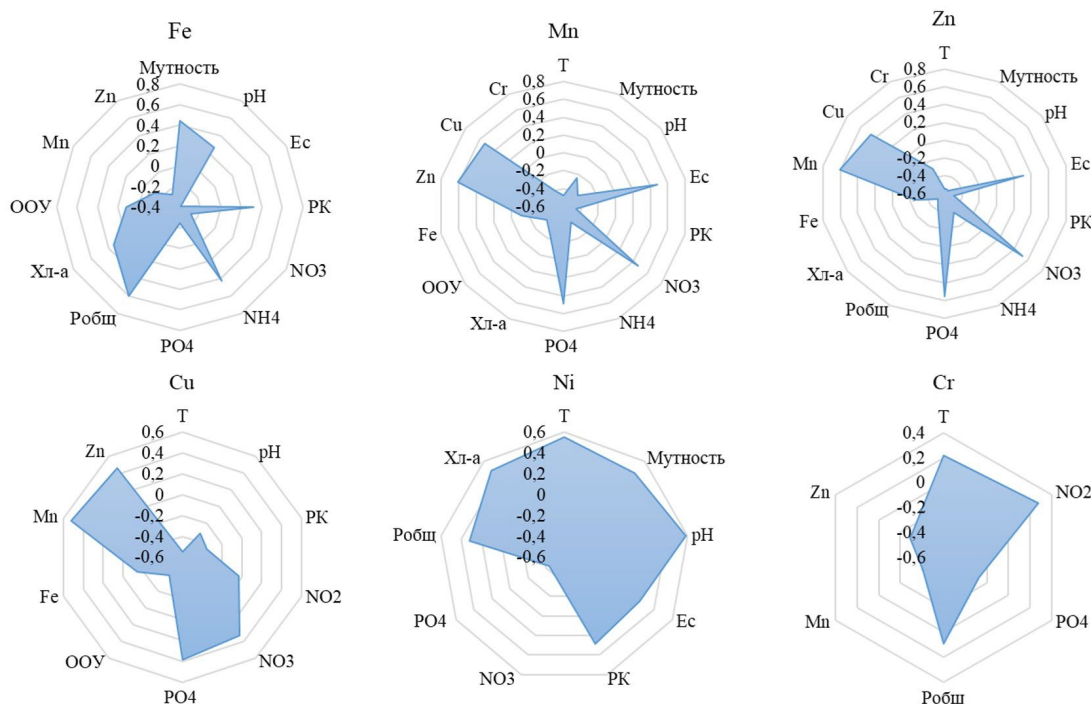


Рис.5. Лепестковая диаграмма значимых корреляционных связей (коэффициент корреляции Спирмена, $p > 0,05$) между концентрациями металлов в воде озера Котокель и физико-химическими показателями, содержанием биогенных веществ.

жание было ниже предела обнаружения. Умеренно положительную взаимосвязь отмечена в парах Mn-Zn (0,61), Mn-Cu (0,53) и Zn-Cu (0,46), умеренно отрицательная – в парах Mn-Cr (-0,41). Низкие коэффициенты корреляции косвенно могут свидетельствовать о разных источниках (естественные/антропогенные), а также путях поступления (смыв с прилегающих территорий, поступление с подземными водами, мобилизация из илистых отложений) исследуемых ТМ в воде оз. Котокель. При этом наблюдаются более высокие положительные корреляции некоторых металлов с физико-химическими параметрами и биогенными веществами. В частности - Fe с общим фосфором (0,60), мутностью (0,44) и аммонийным азотом (0,43), что может указывать на поступление данного металла с прилегающих территорий с органическим веществом в результате смыва талыми и дождевыми водами. Концентрации Mn, повышение которых отмечено в зимний период, закономерно демонстрировали отрицательную связь с pH (-0,40), температурой (-0,48) и DO (-0,46), и положительную с Ec (0,48) а также биогенами - нитратным азотом (0,47), фосфатным фосфором (0,49), высвобождение которых наблюдается при распаде органического вещества в подледный период. Схожим с Mn поведением характеризовался Zn, демонстрировавший аналогичные связи с показателями среды и нутриентами, при этом для Zn дополнительно отмечались отрицательные связи с TP (-0,42) и Chl-a (-0,50). Для Ni отмечена положительная связь с температурой (0,55), мутностью (0,46), pH (0,59) и Chl-a (0,49), что обусловлено наибольшими его содержаниями в воде в летнее время, когда значения этих показателей максимальны.

На Рис. 6 представлены графики на основе анализа методом главных компонент (МГК) по трем первым компонентам. МГК-анализ выявил три основных компонента с собственными значениями больше 1, которые в совокупности объясняли 63,01 % общей дисперсии. Группировка образцов наблюдалась в первую очередь по сезонам, а не по месту отбора проб. Это свидетельствует о том, что на поступление и накопление растворенных форм ТМ в озерной воде, а также их потенциальную адсорбцию или десорбцию большое влияние оказывают сезонные изменения физико-химических условий и

интенсивности развития биологических процессов. По ГК-1 (38,56 %) с наибольшей нагрузкой на физико-химические параметры воды (кроме Ec), $P_{\text{общ}}$ и Chl-a наблюдалось разделение проб на подледный (зимний) и период открытой воды (летний и осенний). При этом Ec, содержание Mn, Zn и Cu (наиболее высокие в зимних пробах) были отрицательно связаны с температурой, мутностью, pH и содержанием $P_{\text{общ}}$, Chl-a и Fe (которые повышаются в период открытой воды). По второй компоненте ГК-2 (15,50 %) выделялся кластер проб весеннего периода с большим содержанием ООУ, N-NH₄ и Cr с Ni. Третья компонента ГК-3 (8,56 %) с наибольшей нагрузкой на Fe и $P_{\text{общ}}$ разделила летние и осенние образцы.

3.3. Оценка уровня загрязнения и экологического риска

Уровень загрязнения воды металлами в озере Котокель и воздействие на водную флору и фауну оценивались с использованием показателей Heavy metal evaluation index (HEI), Nemerow pollution index (NPI) и Ecological risk assessment (ERI).

Значения HEI варьировали от 0,71 до 20,97 при среднем значении 2,54 (Таблица 2). Пробы воды с практически всех точек отбора относились к классу «низкое загрязнение». Исключением была одна проба, отобранная в подледный период вблизи турбазы «Гэсэр» (точка отбора 4), которая была отнесена к классу «среднее загрязнение», в основном за счет повышенного содержания Mn. В сезонном аспекте более высокие значения индекса HEI наблюдались в зимний период.

Значения NPI, в отличие от HEI, показали больше градаций уровня загрязнения. Это связано с тем, что NPI учитывает максимальные и средние значения отдельных металлов и может подчеркнуть роль серьезных загрязнителей (Li et al., 2022). В весенний и летний период вода в озере в основном соответствовала категориям «незагрязненная» в акватории и «слабозагрязненная» в прибрежных точках. Осенью степень загрязнения варьировала от «слабозагрязненная» до «умеренно загрязненная» в основном за счет увеличения концентрации Fe. Максимальных значений NPI, как и HEI, достигал

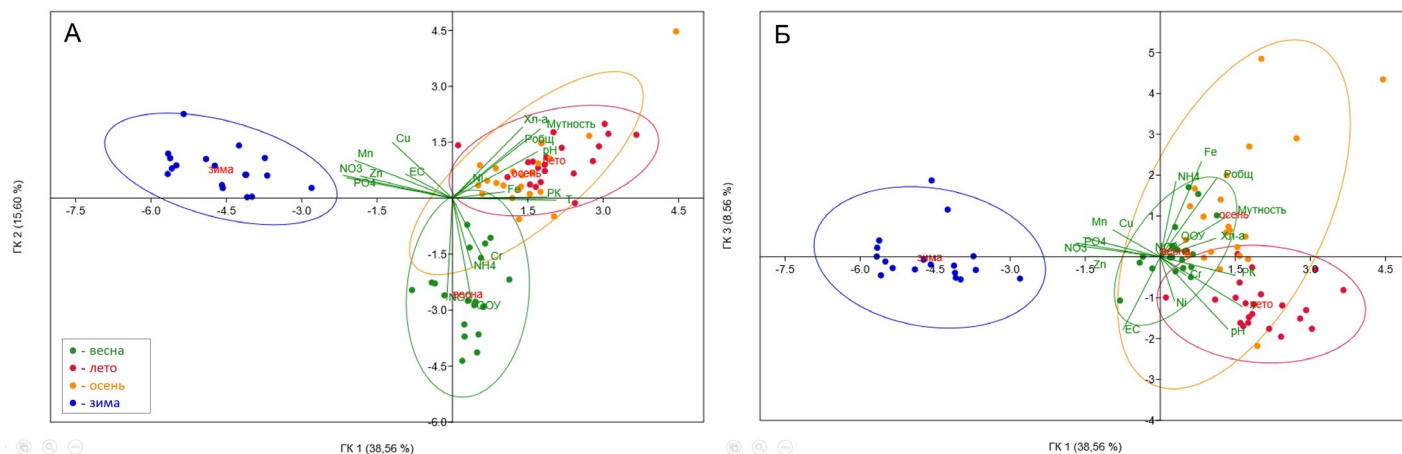


Рис.6. Биплоты МГК-анализа данных параметров качества и содержания тяжелых металлов в воде оз. Котокель. А – по ГК-1 и ГК-2, Б – по ГК-1 и ГК-3.

Таблица 2. Значения индексов загрязненности воды оз. Котокель (HEI и NPI) и экологического риска (ERI) в разные сезоны (минимальное (min), максимальное (max) и среднее ($\bar{x}$) значения).

Сезон	HEI			NPI			ERI		
	min	max	$\bar{x}$	min	max	$\bar{x}$	min	max	$\bar{x}$
Весна	0,71	3,77	1,58	0,40	1,61	0,66	0,00	3,43	0,62
Лето	0,91	8,26	1,89	0,26	3,47	0,63	0,05	0,89	0,17
Осень	1,47	5,30	2,32	0,63	2,50	0,94	0,09	0,32	0,19
Зима	1,86	20,97	4,55	0,45	12,69	1,94	0,11	1,97	0,39

в зимний период, и, согласно критериям ранжирования, вода в этот период преимущественно соответствовала категориям «умеренно загрязненная» и «сильно загрязненная». Необходимо отметить, что наибольший вклад в значение индекса NPI в период открытой воды вносило Fe, в подледный период резко повышалась роль Mn.

Значения ERI в большинстве случаев были ниже единицы, составляя в среднем 0,34, что соответствовало категории «отсутствие риска» практически во все сезоны года. Лишь 6 проб (5 весной и 1 зимой) соответствовали категории «low risk» за счет присутствия кадмия в воде вблизи населенных пунктов и баз отдыха, при этом значения ERI не превышали 3,43.

Результаты расчета индексов HEI, NPI и ERI по полученным данным свидетельствуют о том, что загрязненность исследованными ТМ воды оз. Котокель носит преимущественно природный характер. Однако наличие случаев повышения значений ERI указывает на необходимость постоянного контроля за локальными источниками загрязнения.

4. Заключение

Выполненное впервые детальное исследование содержания растворенных форм ТМ в оз. Котокель позволило выявить некоторые особенности их сезонной динамики и пространственного распределения. Отмечена высокая неоднородность содержаний металлов в акватории озера более выраженная в подледный период для марганца и цинка, и, не зависящая от сезона, для железа, меди, хрома и никеля. Разгрузка трещинно-жильных вод была вероятной причиной локальных повышений концентраций металлов, наблюдавшихся вблизи зон разломов и достигавших 1-2 порядков. В сезонном аспекте в подледный период были отмечены наибольшие содержания марганца, цинка и меди и наименьшие – железа, хрома и никеля. Это может быть связано с их различным геохимическим поведением и источниками поступления. Для первой группы вероятно мобилизация зимой из илистых отложений и подземных вод, для второй – поступление в период открытой воды с талыми и дождевыми водами, несущими в водоем продукты выветривания горных пород и органическое вещество почв с водосбора. Корреляционный и МГК анализ данных показали определяющее влияние сезонных изменений физико-химических условий и интен-

сивности развития биологических процессов на содержание ТМ. Невысокие коэффициенты корреляции косвенно могут свидетельствовать о разных источниках (естественные/антропогенные), а также путях поступления (смыв с прилегающих территорий, поступление с подземными водами, мобилизация из илистых отложений) исследуемых ТМ в воде оз. Котокель.

Впервые была проведена оценка текущего состояния степени загрязненности вод озера Котокель растворенными ТМ и связанного экологического риска. Рост загрязненности озерных вод возрастает от весны (категории «незагрязненная» в акватории и «слабо загрязненная» в прибрежных зонах) к осени («умеренно загрязненная») и зиме («сильно загрязненная»). Наибольший вклад в значения индексов загрязнения в период открытой воды вносило железо, в подледный период резко повышалась роль марганца. Значения индекса экологического риска (ERI) в большинстве случаев указывали на отсутствие риска для гидробионтов во все сезоны года. Результаты оценки степени загрязненности и экологического риска свидетельствуют о том, что загрязненность исследованными ТМ воды оз. Котокель носит преимущественно природный характер. Однако наличие единичных случаев повышения значений ERI от категории «риск отсутствует» до «низкий риск» указывает на необходимость постоянного контроля за локальными источниками загрязнения.

Собранный материал поможет улучшить понимание процессов поступления и накопления металлов с учетом природных и антропогенных факторов в условиях климатических изменений в озерных экосистемах, а также будет полезным для управления качеством воды в аналогичных гидрологических системах и при разработке соответствующих мер по смягчению распространения металлов в озеро Байкал.

Благодарности

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного Фонда 24-17-00333, <https://rscf.ru/project/24-17-00333/>

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Ангахаева Н.А., Плюснин А.М., Украинцев А.В. и др. 2021. Гидрогеохимические особенности озера Котокель. Науки о Земле и недропользование 44(2): 106–115. DOI: [10.21285/2686-9993-2021-44-2-106-115](https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-106-115)
- Батиметрия естественных озер России. [Электронный ресурс]. URL: http://lakemaps.org/ru/atlas_maps.asp?name=Buryatia&geotype=rp&local=Республика%20Бурятия (дата обращения 02.11.2024).
- Воробьева И.Б., Белозерцева И.А., Власова Н.В. и др. 2018. Современное состояние водотоков в устьевых областях восточного побережья озера Байкал. Успехи современного естествознания 1: 86–92. DOI: [10.17513/use.36656](https://doi.org/10.17513/use.36656)
- Воробьевская Е.Л., Седова Н.Б., Чевель К.А. и др. 2021. Биогенные элементы и качество воды оз. Котокель и некоторых соседних водоемов. Сборник Ecological Studies, Hazards, Solutions. Том 27: 54–62.
- ГОСТ 17.1.4.02-90. 1999. Вода. Методика спектрофотометрического определения хлорофилла а. Межгосударственный стандарт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200009756>
- ГОСТ 17.1.3.07-82. 1982. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. Межгосударственный стандарт. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012472>
- ГОСТ 57162-2016. 2016. Вода. Определение содержания элементов методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электротермической атомизацией. Национальный стандарт Российской Федерации. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200140389>
- Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране». 2022. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации: Москва, Россия. URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/gosudarstvennye_doklady/o_sostoyanii_ozera_baykal_i_merakh_po_ego_okhrane
- Зенгина Т.Ю., Бедринова Д.С. 2015. Изучение качества поверхностных вод в рекреационной зоне озера Котокель (Республика Бурятия). Вестник Белорусского государственного университета. Серия 2: Химия. Биология. География 2: 63–69.
- Перязева Е.Г., Плюснин А.М., Гармаева С.З. и др. 2016. Особенности формирования химического состава вод озёр восточного побережья озера Байкал. География и природные ресурсы 5: 49–59. DOI: [10.21782/GIPRO206-1619-2016-5\(49-59\)](https://doi.org/10.21782/GIPRO206-1619-2016-5(49-59))
- Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552 (ред. от 12.10.2018). 2016. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120>
- Пронин Н.М., Убутонов Л.Л. 2013. Озеро Котокельское: природные условия, биота, экология. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН.
- Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Часть I. 2009. Ростов-на-Дону: Наука-Образование-Культура.
- Чебыкин Е.П., Сорокикова Л.М., Томберг И.В. и др. 2012. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам. Химия в интересах устойчивого развития 20(5): 613–631.
- Шагжиев К.Ш., Бабилов В.А., Жигмитова С.Б. и др. 2017. Восточное побережье оз. Байкал как зона притяжения туристов из стран внутренней Азии. Природа Внутренней Азии 1(2): 54–76. DOI: [10.18101/2542-0623-2017-1-54-76](https://doi.org/10.18101/2542-0623-2017-1-54-76)
- Argun Y.A. 2025. Examination of heavy metal concentrations and their interaction with anthropogenic sources in Ermenek Dam Lake (Turquoise Lake). Environmental Geochemistry and Health 47: 58. DOI: [10.1007/s10653-025-02367-2](https://doi.org/10.1007/s10653-025-02367-2)
- Bazarsadueva S.V., Taraskin V.V., Budaeva O.D. et al. 2023. First Data on PAE levels in Surface Water in Lakes of the Eastern Coast of Baikal. International Journal of Environmental Research and Public Health 20(2): 1173. DOI: [10.3390/ijerph20021173](https://doi.org/10.3390/ijerph20021173)
- Bazarzhapov T.Z., Shiretorova V.G., Radnaeva L.D. et al. 2023. Distribution of heavy metals in water and bottom sediments in the basin of lake Gusinoe (Russia): Ecological risk assessment. Water 15(19): 3385. DOI: [10.3390/w15193385](https://doi.org/10.3390/w15193385)
- Bhateria R., Jain D. 2016. Water Quality Assessment of Lake Water: a Review. Sustainable Water Resources Management 2: 161–173. DOI: [10.1007/s40899-015-0014-7](https://doi.org/10.1007/s40899-015-0014-7)
- Botle A., Salgaonkar S., Tiwari R. et al. 2023. Brief status of contamination in surface water of rivers of India by heavy metals: a review with pollution indices and health risk assessment. Environmental Geochemistry and Health 45(6): 2779–2801. DOI: [10.1007/s10653-022-01463-x](https://doi.org/10.1007/s10653-022-01463-x)
- Brown K.P., Gerber A., Bedulina D. et al. 2021. Human impact and ecosystemic health at Lake Baikal. WIREs Water 8(4): e1528. DOI: [10.1002/wat2.1528](https://doi.org/10.1002/wat2.1528)
- Das S. 2024. Assessment of the ecotoxicity of heavy metal contaminants on aquatic organisms: A review on the impact of Lead, Chromium, Cadmium, Zinc and Mercury. African Journal of Biological Sciences 6(5): 8871–8883. DOI: [10.48047/AFJBS.6.5.2024.8871-8883](https://doi.org/10.48047/AFJBS.6.5.2024.8871-8883)
- Dippong T., Senila M., Cadar O. et al. 2024. Assessment of the heavy metal pollution degree and potential health risk implications in lakes and fish from northern Romania. Journal of Environmental Chemical Engineering 12(2): 112217. DOI: [10.1016/j.jece.2024.112217](https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112217)
- Edet A.E., Offiong O.E. 2002. Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo-Odukpani area, Lower Cross River Basin (southeastern Nigeria). GeoJournal 57(4): 295–304. DOI: [10.1023/B:GEJO.0000007250.92458.de](https://doi.org/10.1023/B:GEJO.0000007250.92458.de)
- Fluet-Chouinard E., Messenger M.L., Lehner B. et al. 2017. Freshwater Lakes and Reservoirs. In: Finlayson C., Milton G., Prentice R. et al. (Eds.), The Wetland Book II: Distribution, description, and conservation. Springer, pp. 125–142. DOI: [10.1007/978-94-007-6173-5_201-2](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6173-5_201-2)
- Hedayatzadeh F., Ildoromi A., Hassanzadeh N. et al. 2024. Comprehensive monitoring of contamination and ecological-health risk assessment of potentially harmful elements in surface water of Maroon-Jarahi sub-basin of the Persian Gulf, Iran. Environmental Geochemistry and Health 46(10): 411. DOI: [10.1007/s10653-024-02181-2](https://doi.org/10.1007/s10653-024-02181-2)
- Jolaosho T.L., Elegbede I.O., Ndimele P.E. et al. 2024. Occurrence, distribution, source apportionment, ecological and health risk assessment of heavy metals in water, sediment, fish and prawn from Ojo River in Lagos, Nigeria. Environmental Monitoring and Assessment 196(2): 109. DOI: [10.1007/s10661-023-12148-y](https://doi.org/10.1007/s10661-023-12148-y)
- Kumar S.B., Padhi R.K., Mohanty A.K. et al. 2020. Distribution and ecological- and health-risk assessment of heavy metals in the seawater of the southeast coast of India. Marine Pollution Bulletin 161(Pt A):111712. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2020.111712](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111712)
- Li L., Wu J., Lu J. et al. 2022. Water quality evaluation and ecological-health risk assessment on trace elements in surface water of the northeastern Qinghai-Tibet Plateau. Ecotoxicology and Environmental Safety 241: 113775. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2022.113775](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113775)
- Liu X., Chen S., Yan X. et al. 2021. Evaluation of potential ecological risks in potential toxic elements contam-

inated agricultural soils: Correlations between soil contamination and polymetallic mining activity. *Journal of Environmental Management* 300: 113679. DOI: [10.1016/j.jenvman.2021.113679](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113679)

Naz S., Mansouri B., Chatha A.M. et al. 2022. Water quality and health risk assessment of trace elements in surface water at Punjnad Headworks, Punjab, Pakistan. *Environmental Science and Pollution Research* 29(40): 61457–61469. DOI: [10.1007/s11356-022-20210-4](https://doi.org/10.1007/s11356-022-20210-4)

Ozdemir K., Ciner M.N., Ozcan H.K. et al. 2024. Evaluation of Water and Sediment Quality in Lake Mogan, Türkiye. *Water* 16(11): 1546. DOI: [10.3390/w16111546](https://doi.org/10.3390/w16111546)

Pellinen V., Cherkashina T., Gustaytis M. 2021. Assessment of metal pollution and subsequent ecological risk in the coastal zone of the Olkhon Island, Lake Baikal, Russia. *Science of The Total Environment* 786: 147441. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.147441](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147441)

Prasad S., Wei Y., Chaminda T. et al. 2024. Spatiotemporal Assessment of Water Pollution for Beira Lake, Sri Lanka. *Water* 16(11): 1616. DOI: [10.3390/w16111616](https://doi.org/10.3390/w16111616)

Radnaeva L.D., Bazarzhapov T.Z., Shiretorova V.G. et al. 2022. Ecological State of Lake Gusinoe–A Cooling Pond of the Gusinozersk GRES. *Water* 14(1): 4. DOI: [10.3390/w14010004](https://doi.org/10.3390/w14010004)

Salehi M. 2022. Global water shortage and potable water safety; Today's concern and tomorrow's crisis. *Environmental International* 158: 106936. DOI: [10.1016/j.envint.2021.106936](https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106936)

Şener E., Şener Ş., Bulut C. 2023. Assessment of heavy metal pollution and quality in lake water and sediment by various index methods and GIS: A case study in Beyşehir Lake, Turkey. *Marine Pollution Bulletin* 192(1–2): 115101. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2023.115101](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115101)

Shetaia S.A., Nasr R.A., Lasheen E.S.R. et al. 2023. Assessment of heavy metals contamination of sediments and surface waters of Bitter lake, Suez Canal, Egypt: Ecological risks and human health. *Marine Pollution Bulletin* 192: 115096. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2023.115096](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115096)

Shiretorova V.G., Nikitina E.P., Bazarsadueva S.V. et al. 2025. Current State of Lake Kotokel (Eastern Cisbaikalia, Russia): Hydrochemical Characteristics, Water Quality, and Trophic Status. *Water* 17(4): 545. DOI: [10.3390/w17040545](https://doi.org/10.3390/w17040545)

Tanjung R.H.R., Indrayani E., Agamawan L.P.I. et al. 2024. Water quality assessment to determine the trophic state and suitability of Lake Sentani (Indonesia) for various utilisation purposes. *Water Cycle* 5: 99–108. DOI: [10.1016/j.watcyc.2024.02.006](https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2024.02.006)

Wang C., Wang K., Zhou W. et al. 2023. Occurrence, Risk, and Source of Heavy Metals in Lake Water Columns and Sediment Cores in Jiangnan Plain, Central China. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20(4): 3676. DOI: [10.3390/ijerph20043676](https://doi.org/10.3390/ijerph20043676)

World Health Organization (WHO). 2017. Guidelines for Drinking Water Quality 4th edition, incorporating the 1st addendum; WHO: Geneva, Switzerland.

Yakovlev E., Druzhinin S., Druzhinina A. et al. 2023. Trace metals in surface water of the Pechora River and its tributaries: Content, water quality and risks assessment (Arctic Ocean basin). *Marine Pollution Bulletin* 194(Pt B): 115317. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2023.115317](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115317)

Zamora-Ledezma C., Negrete-Bolagay D., Figueroa F. et al. 2021. Heavy metal water pollution: A fresh look about hazards, novel and conventional remediation methods. *Environmental Technology & Innovation* 22: 101504. DOI: [10.1016/j.eti.2021.101504](https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101504)

Zhang Z., Lou S., Liu S. et al. 2024. Potential risk assessment and occurrence characteristic of heavy metals based on artificial neural network model along the Yangtze River Estuary, China. *Environmental Science and Pollution Research* 31(22): 32091–32110. DOI: [10.1007/s11356-024-33400-z](https://doi.org/10.1007/s11356-024-33400-z)

Zhou Q., Yang N., Li Y. et al. 2020. Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017. *Global Ecology and Conservation* 22: e00925. DOI: [10.1016/j.gecco.2020.e00925](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00925)