

# Accumulations of Cr, Cu, Zn and Pb in sediments under cage trout farms of Lake Ladoga

Original Article

LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGY

Guzeva A.V., Lapenkov A.E.

*Institute of Limnology of Russian Academy of Sciences – a separate structural unit of the Federal State Budgetary Institution of Science "St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences", Sevastyanova st., 9, St. Petersburg, 196105, Russia*

**ABSTRACT.** This study presents an environmental assessment of the accumulation levels of trace metals (Cr, Cu, Zn, and Pb) in the sediments of Lake Ladoga near three cage trout farms. Samples were collected at the end of an intensive fish feeding period from both the cage and reference sites. Using ICP-MS, acid-soluble and labile metal forms were analyzed. The results show that Zn had highest accumulation levels, which can be attributed to organic waste from the farms. The labile forms of Zn (up to 53%) pose serious risks of secondary pollution in the water column. However, no significant input of Cu and Pb from the trout farms was found. Elevated Cr concentrations (up to 133 mg/kg) were observed in both the cage and reference sites, mainly due to natural factors such as geochemical features of the surrounding bedrocks. The integrated Pollution Load Index (PLI) indicated moderate pollution levels, ranging from 1.0 to 1.2. These results highlight the need for monitoring Zn content under cage farms, development of sediment quality guidelines, and assessment of hydrological and geochemical conditions in aquaculture planning.

**Keywords:** Sediments, trout farms, toxic metals, aquaculture, Lake Ladoga

**For citation:** Guzeva A.V., Lapenkov A.E. Accumulations of Cr, Cu, Zn and Pb in sediments under cage trout farms of Lake Ladoga // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 583-599. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-583

## 1. Introduction

Aquaculture is currently one of the most dynamically developing sectors of the global food industry. In Russia, the Republic of Karelia holds a leading position in the production of cage-reared rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). There are already over two dozen trout farms in the northern part of Lake Ladoga requiring environmental assessment of their impact.

Fish farm waste, rich in nutrients and trace elements, enters the water environment and can accumulate in the sediments under cages (Kaya and Pulatsu, 2017; Ji et al., 2021; Custodio et al., 2022; Zaripova et al., 2024). While sediments are the final destination for chemical substances to accumulate, changes in the physicochemical parameters of the environment may transform them into sources of secondary pollution. For example, during accumulation and decomposition of large amounts of organic matter, pH and redox potential (Eh) levels may decrease facilitating metal desorption from the solid phase of sediments and increasing the risk of ion migration into the water column (Turner,

2000; Guzeva et al., 2021). Dissolved forms of metals can have a toxic effect on both the biological communities of the reservoir itself and on farmed fish.

Hydrological, chemical, and geological characteristics of the water body as well as the composition of the feed, the amount of fish and the farm's remediation plan are taken into account in determining the level and spatial extent of aquaculture waste accumulation under cage modules (Federal Law of the Russian Federation of 20.12.2004 N 166-FZ). Trace elements such as Cr, Cu, and Zn are essential for the health status, growth and development of trout and can be found in both commercial feed and fish tissues (Zhang et al., 2018; Lall and Kaushik, 2021). However, these sources may also contain harmful elements such as Pb, Cd and Hg (Majlesi et al., 2019; Barszcz and Sidoruk, 2024). Additionally, the use of antifouling coatings and paints on nets and cage components may introduce compounds of Pb and Cu (Patent of the Russian Federation No. RU2478114C1). It is reported that sediments near marine and lake-based cage fish farms have higher concentrations of metals (Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Cd, Pb, and Ni) compared to those

\*Corresponding author.

E-mail address: [lapa13art@gmail.com](mailto:lapa13art@gmail.com) (A.E. Lapenkov)

**Received:** June 06, 2025; **Accepted:** August 06, 2025;

**Available online:** August 31, 2025

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



in control areas (Sutherland et al., 2007; Russell et al., 2011; Xie et al., 2020; Kucuksezgin et al., 2022; Melo Júnior et al., 2023). However, in Russia, there is limited data on trace metal concentrations in sediments near freshwater trout farms, which hinders our understanding of the spatial and temporal dynamics of pollution. Furthermore, the lack of maximum permissible concentrations of chemical substances in sediments in Russia makes environmental assessments difficult. Our previous research on a trout farm in Lake Ladoga revealed a significant increase in Zn and Cu content in surface sediments beneath cages compared to background levels, with concentration peaks at the end of an intensive fish feeding period (Guzeva et al., 2024). Thus, there is an urgent need for further studies in other coastal zones of Lake Ladoga used for aquaculture, especially in light of ongoing scientific and industrial discussions on the impacts of aquaculture.

The purpose of this study is to evaluate the environmental impact of accumulation and potential geochemical mobility of Cr, Cu, Zn, and Pb in the sediments affected by three cage trout farms in Lake Ladoga. These farms are situated in the bays with diverse hydrological and morphometric features. The data obtained reveal distinct patterns of trace element accumulation in the sediments, providing crucial insights into monitoring aquaculture operations in other regions of Russia.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Study area

Lake Ladoga (60°50'N, 31°30'E) is the largest freshwater lake in Europe, with the area of 17,870 km<sup>2</sup> and volume of 848 km<sup>3</sup>, located in northwestern Russia. The northern part of the lake, where the study was conducted, is characterized by a complex shoreline morphology with archipelagos, islands, and deep bays, providing natural protection from wind and waves and optimal conditions for cage trout farming (Rumyantsev and Drabkova, 2002). This region belongs to the temperate continental climate zone, with annual precipitation of 650 – 700 mm. West and north-west winds prevail (average speed 4–6 m/s), modulating wave conditions (wave height ≤ 1.5 m in open areas, ≤ 0.5 m in bays). Ice thickness during winter reaches 60 – 80 cm, and bottom water temperatures stabilize around +4 °C. A pronounced thermocline forms in summer, limiting vertical oxygen transfer.

Farm K (Fig. 1) is located in a large bay 2.2 km long, with maximum depths of 30 m near Lahdenpohja. The bay is connected to other bays by three channels (50 – 200 m wide), allowing water exchange with the open lake.

Farm S is situated near Sortavala in a strait (150 – 300 m wide) between islands with depths of 10 – 20 m. This zone may be subject to strong wind-driven currents that promote turbulent mixing of the water column under northerly and southerly winds.

Farm V is located off the coast of Valaam Island in an isolated bay 820 m long with maximum depths of 20 – 30 m under the cages. Narrow (10 – 15 m) and shallow (depth ~5 m) channels restrict water exchange,

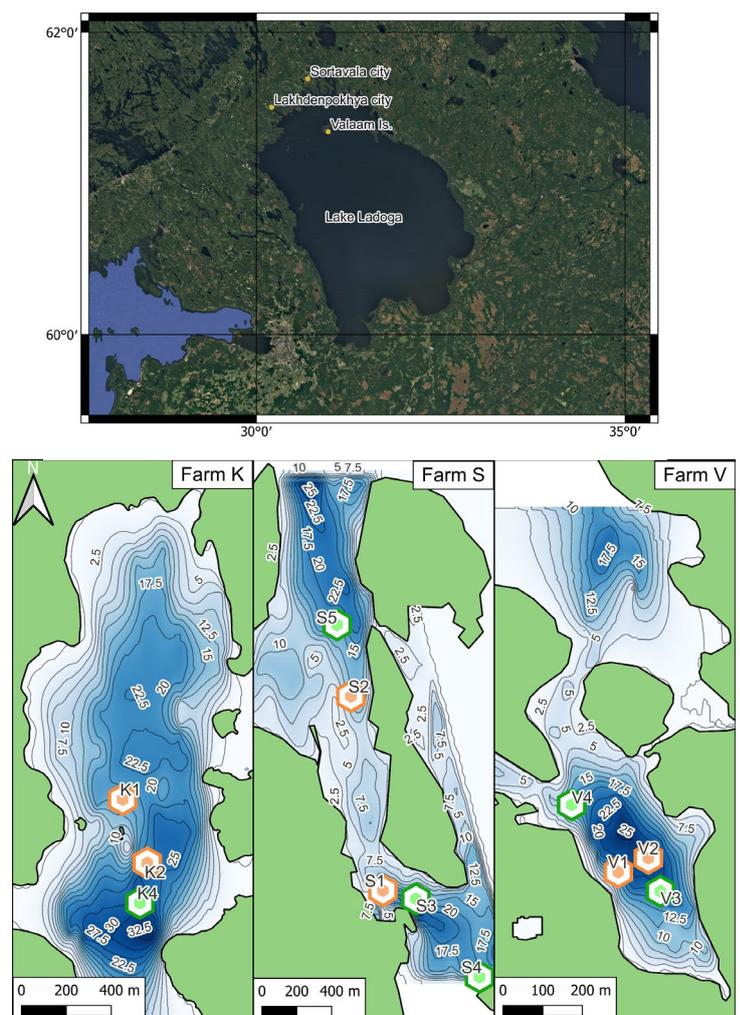
creating a stagnant hydrological regime (Zuyev and Zueva, 2024).

Wind-driven currents play a key role in the distribution of organic matter from the cages. Farm S features high energy currents causing wide dispersion of aquaculture waste. In Farms K and V, weak currents and closed circulation contribute to the accumulation of highly organic sediments beneath the cages.

### 2.2. Sampling procedure

Sediment samples were collected using a gravity corer at the end of November 2023. By early winter, the intensive feeding season for trout had ended, and the layer of freshly accumulated organic sediments under the cages had reached its maximum thickness (Lapenkov et al., 2023; 2024).

Sampling locations are shown in Fig. 1. Each farm had both cage and reference sites. Previous studies showed high organic matter content in the surface sediment layer at cage sites: 2 – 7 times higher than reference values (Lapenkov et al., 2024). Control points were located 50 – 100 m from the outermost modules. At this distance, the organic content in the surface sed-



**Fig.1.** Bathymetric diagram (according to Lapenkov et al., 2024) of the studied fish-breeding areas of Lake Ladoga with sampling sites in the area of the cities of Lakhdenpohja (Farm K) and Sortavala (Farm S), as well as on Valaam Island (Farm V). The cage sites are marked in orange, the reference sites in green.

iment layer remains consistent throughout the year and reflects background levels, as seen in the lower layers of cores taken from cage sites (Lapenkov et al., 2023).

After coring, the lithological characteristics of the sediments were described in the field, as detailed in earlier studies (Lapenkov et al., 2024). The sediments at all three farms were similar in grain size composition: soft clayey silts with 5 – 15% silt admixture. Samples were placed in plastic bags and transported to the laboratory in a thermally insulated container.

### 2.3. Laboratory analysis

The 0 – 10 cm layer of sediment was used for metal content analysis, as it contains the highest mass percentage of organic matter compared to deeper layers. Furthermore, the top 10 cm also represents the primary habitat for benthic organisms.

Two types of extracts were analyzed: acid-soluble (70% HNO<sub>3</sub> + 38% HCl + 33% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) and labile (1M CH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>NH<sub>4</sub>, pH 4.8) metal forms. The methods of extraction and details of the reagents used are described in previous publications (Guzeva et al., 2022; 2024) and regulatory documents GD 52.18.289 – 90. The acid mixture is effective in dissolving most metal ions, including highly stable forms that may play a role in biochemical processes, with the exception of insoluble aluminosilicate minerals. On the other hand, the labile extract targets the most mobile metal ions, which are potentially bioavailable, specifically those in exchangeable and sorbed forms. These forms are the least stable and are more likely to migrate if there are changes in environmental parameters such as water ion composition, pH, and Eh. All extracts and blanks were prepared in duplicate. Results were considered valid if the difference between replicates was ≤ 20%. A certified reference material (Baikal Lake sediment "BIL-1 – GSO 7126-94") was used for measurement quality control.

Metal concentrations in extracts were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) on an XSeries 2 ICP-MS (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) at the analytical laboratory of Karelian Research Centre RAS. Each solution was measured three times and the average was taken. Relative standard deviations (%) for acid-soluble forms were: Cr (0.3 – 2.5), Cu (0.9 – 2.7), Zn (0.2 – 1.9), Pb (0.4 – 2); for labile forms: Cr (0.5 – 5), Cu (0.4 – 4), Zn (0.3 – 3), Pb (0.6 – 6).

### 2.4. Statistical analysis

For the dataset, the mean, median, and standard deviation were calculated. The relationship between metal input and organic waste from the farms was assessed using Pearson's linear correlation coefficient (*r*). Differences between cage and reference sites were analyzed using the Kruskal–Wallis test (*H*), suitable for evaluating median differences in small sample sizes (*n* < 30).

The level of metal accumulation relative to background values was calculated using the geoaccumulation index (*I*<sub>geo</sub>) (Müller, 1969):

$$I_{geo} = \frac{C}{1.5 \times B}$$

where *C* is the metal concentration in surface sediment under cages, and *B* is the background concentration. The following scale is used: unpolluted (*I*<sub>geo</sub> ≤ 0), unpolluted to moderately polluted (0 < *I*<sub>geo</sub> ≤ 1), moderately polluted (1 < *I*<sub>geo</sub> ≤ 2), moderately to heavily polluted (2 < *I*<sub>geo</sub> ≤ 3), heavily polluted (3 < *I*<sub>geo</sub> ≤ 4), heavily to extremely polluted (4 < *I*<sub>geo</sub> ≤ 5), or extremely polluted (*I*<sub>geo</sub> > 5).

Overall sediment pollution was assessed using the Pollution Load Index (PLI) (Suresh et al., 2011):

$$PLI = (C/F_1 \times C/F_2 \times C/F_3 \dots C/F_n)^{1/n}$$

where *C/F* is the metal concentration divided by the background value, and *n* is the number of elements analyzed. Pollution levels are classified as low (PLI < 1), moderate (1 < PLI < 2), high (2 < PLI < 3), or extremely high (PLI > 3).

To evaluate potential toxicity to freshwater benthic organisms, sediment quality guidelines (SQGs) were applied, using threshold effect concentration (TEC) and probable effect concentration (PEC) values (MacDonald et al., 2000; Li et al., 2015). Metal concentrations below TEC are considered unlikely to cause toxicity, while those above PEC are considered likely to pose a high risk. TEC/PEC values: Cr – 43.4/111; Cu – 31.6/149; Zn – 121/459; Pb – 35.8/128.

Secondary pollution risk (geochemical mobility) was evaluated using the Risk Assessment Code (RAC) (De Andrade Passos et al., 2011), which considers the percentage of labile forms: <1% – no risk, from 1 to 10% – low risk, from 10 to 30% – medium, from 30 to 50% – high, >50% – very high.

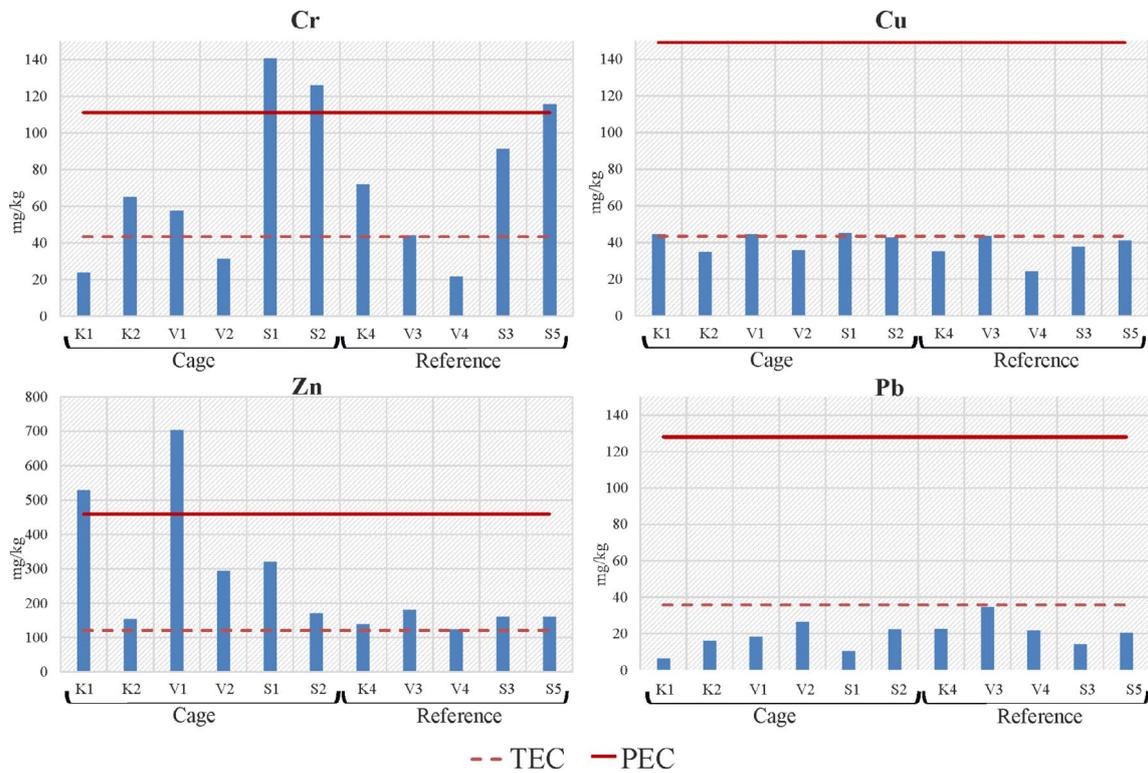
## 3. Results and discussion

### 3.1. Accumulation levels of heavy metals in sediments under cage trout farms

Based on acid-soluble metal concentrations in sediments from the three farms, the order of abundance was: Zn > Cr > Cu > Pb. Results are shown in Fig. 2. Pearson correlation analysis between total organic matter (from previous data Lapenkov et al., 2024) and metal concentrations is illustrated in Fig. 3.

The strongest correlation with organic matter was observed for Zn. A weak positive correlation was found for Cu. This suggests that excess Zn, not absorbed by the fish, enters sediments primarily with organic waste such as uneaten feed and fish feces. Cu appears to be better absorbed by fish, explaining its lower correlation. Furthermore, its content in feed is also lower than that of Zn. Thus, production feed for trout contains up to 600 mg/kg Cu and 10,000 mg/kg Zn (Patent of the Russian Federation No. RU2762722C1). International studies report that up to 87% of feed Zn and 4.3% of feed Cu are excreted by farmed salmon into the aquatic environment (Dean et al., 2007).

The results showed that there was no significant correlation between Pb and organic matter, suggesting that its presence is not primarily due to fish farm waste. While Pb and Cu may also be found in antifouling coat-



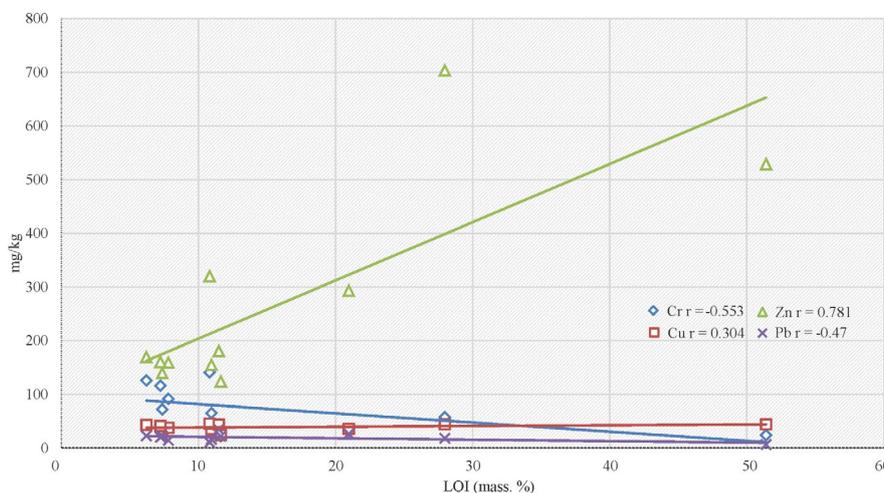
**Fig.2.** Content of acid-soluble forms of metals in sediments under trout farms at cage and reference sites. TEC – threshold effect concentration; PEC – probable effect concentration.

ings and paints, the data suggests that fish farmers do not heavily rely on these materials (Patent of the Russian Federation No. RU2478114C1).

The data on Cr content showed a significant negative correlation with organic matter, indicating that its presence in sediments is mainly influenced by natural geological factors rather than aquaculture waste (see section 3.3).

The comparison of metal concentrations between cage and reference sites at the three farms is presented in Fig. 4. The only significant difference was observed for Zn, which was 2 – 3 times higher in cage sites compared to reference sites. Cu and Pb concentrations were similar to background levels. In two of the farms, Cr content was higher at reference sites, highlighting the dominant role of natural geochemical factors in its presence.

The findings obtained are in line with global studies that have also shown a high accumulation of Zn under fish cages. However, the patterns for Cu, Pb, and Cr in our study were more favorable. For instance, in tilapia (*Oreochromis niloticus*) farms, the concentrations of Zn and Cu at the cage sites were 10 and 2 times higher than in the reference sites, respectively, while the levels of Cr and Pb were stable (Melo Júnior et al., 2023). Similarly, in marine salmon farms, the levels of Zn and Cu under the cages were 5 and 10 times higher than in the control area, respectively (Dean et al., 2007). In the Changshou Reservoir in China, the concentrations of these metals remained elevated at 2 - 3 times even 10 years after the cessation of cage farming (Xie et al., 2020).



**Fig.3.** Correlation (Pearson  $r$ ,  $\alpha = 0.05$ ) between the content of acid-soluble metal forms and the content of organic matter (LOI). LOI values for the 0 – 10 cm sediment layer were taken from a previously published work (Lapenkov et al., 2024).

### 3.2. Features of metal accumulation in sediments beneath trout cage farms in Lake Ladoga

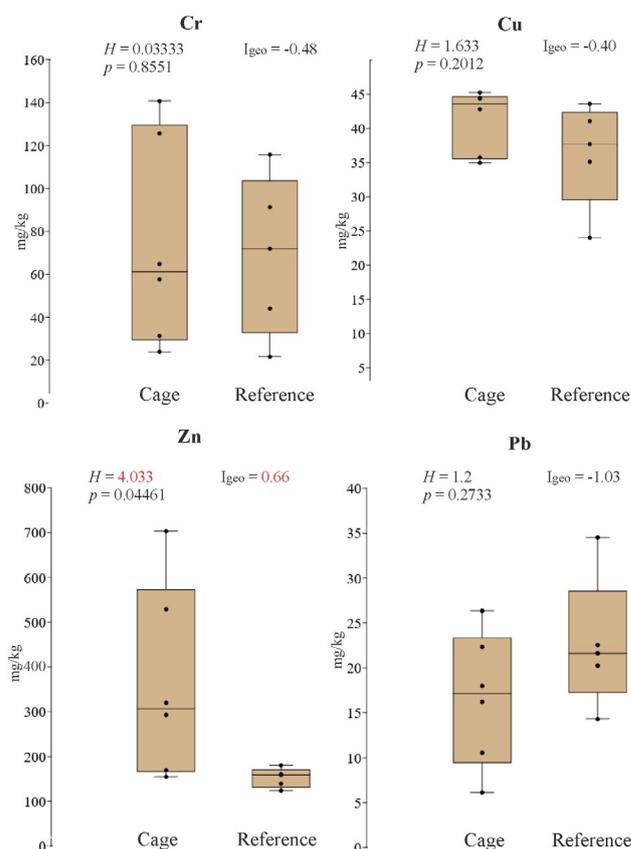
To assess the impact of natural and anthropogenic factors on metal accumulation in sediments of the studied trout farms, the concentrations of Cr, Cu, Zn, and Pb were compared with those in other parts of Lake Ladoga (Petrova, 2006; Slukovskiy, 2015), as well as background (untouched by anthropogenic activity) lakes of southern Karelia (Slukovskii, 2020) and Clarke values (Hans Wedepohl, 1995). The results are presented in Table 1.

Elevated Cr concentrations were obtained in the sediments of Lake Ladoga, with levels 2 – 4 times higher than Clarke values and 2 – 5 times higher than the average values typically found in background lakes in southern Karelia. The highest metal content was observed in Farm S, with values under the cages reaching 133 mg/kg and at the reference site reaching 103 mg/kg. These concentrations are comparable to the maximum concentrations recorded by other authors in Lake Ladoga (105 mg/kg, Table 1). The high levels of Cr can be attributed to the geological structure of the area: volcanics with a lithophile specialization and elevated levels of Co, Bi, Be, Pb, Mg, Ca, Cr, and W (State geological map..., 2015). It is worth noting that the input of organic matter from the cages may serve as a factor in "diluting" the natural Cr concentrations in the sediments of Lake Ladoga.

In the lakes of Karelia, specifically Lake Ladoga, the concentrations of Cu in sediments were found to be 2 – 3 times higher than the Clarke values. This elevated level of Cu, along with Cr, can be attributed to the geochemical characteristics of the region's rocks, which have a specialization in copper-polymetallic minerals (State geological map..., 2015). In the coastal bays used for trout farming, the concentration of Cu in sediments was also found to be 2 – 3 times higher than the Clarke values (Table 1).

The average concentrations of Zn at the reference sites of the farms (139 – 157 mg/kg) were like those found in other parts of Lake Ladoga (79 – 117 mg/kg) and southern Karelia lakes (95 mg/kg), but all values exceeded the Clarke values by 2 – 3 times (Table 1). At the cage sites, the concentration of Zn was 2 - 4 times higher than in sediments found in other parts of Lake Ladoga and southern Karelia lakes. The highest levels of Zn were found at the oldest cage modules (K1, V1, and S1) that have been in use for over 10 years (Fig. 2). This suggests that the high accumulation of Zn in sediments is primarily due to aquaculture activities. The most favorable situation in terms of Zn accumulation was observed in Farm S, which has a location in a strait with better water exchange compared to the stagnant closed bays of Farms K and V.

At both reference and cage sites of the studied farms, Pb concentrations in sediments were at levels typical for other areas of Lake Ladoga, southern Karelia lakes, and Clarke values. Pb levels under trout cages are primarily determined by natural factors.



**Fig.4.** Statistical diagram of the content of acid-soluble forms of metals in cage and reference sites: values, average and standard deviation.  $H$  is the calculated value of the Kruskal-Wallis criterion ( $\alpha = 0.05$ );  $I_{geo}$  is the index of geoaccumulation.

### 3.3. Geoecological assessment of metal accumulation in the zone of influence of trout cage farms in Lake Ladoga

For Zn, concentrations at all sites exceeded the threshold effect concentration (TEC). At sites with long-standing cage modules (K1 and V1), levels exceeded the probable effect concentration (PEC), Fig. 2. Zn also had the highest  $I_{geo}$  values, indicating moderate sediment contamination, Fig. 4. Notably, the proportion of labile (bioavailable) Zn ranged from 12% to 53%, corresponding to moderate to high secondary pollution risk (Fig. 5). This suggests that Zn in these sediments is primarily bound in weakly stable compounds that are sensitive to changes in environmental conditions, such as pH. Iron(III) hydroxides, which are key sorbents for metals, can dissolve  $Fe(III) \rightarrow Fe(II)$  under reducing conditions and low pH, releasing Zn. Previous research has shown that sediments under cages often experience acidic conditions (pH 6.0 – 6.4) and reducing conditions ( $Eh < -50$  mV) due to low water exchange and intense organic matter input (Lapenkov et al., 2024). Therefore, the high Zn levels under cage modules (especially above PEC) in these geochemical and hydrological conditions pose potential ecological risks for aquatic communities and farmed fish.

Cu and Pb concentrations did not exceed TEC values at any site, nor did they present a risk to the ecosystem (Fig. 2). The proportion of their labile forms was under 10%, indicating low mobility and minimal contribution from cage farms.

Cr concentrations exceeded TEC and, in Farm S, even PEC values in both cage and reference sites (Fig. 2). However, labile Cr forms never exceeded 7%, suggesting low secondary pollution risk (Fig. 5). As discussed, Cr accumulation is mainly driven by the region's geological background, so Cr occurs in stable, non-bioavailable mineral forms.

At all three farms, the Pollution Load Index (PLI) values ranged around 1, indicating low to moderate pollution levels and relatively favorable environmental conditions under trout cages (Table 1).

#### 4. Conclusions

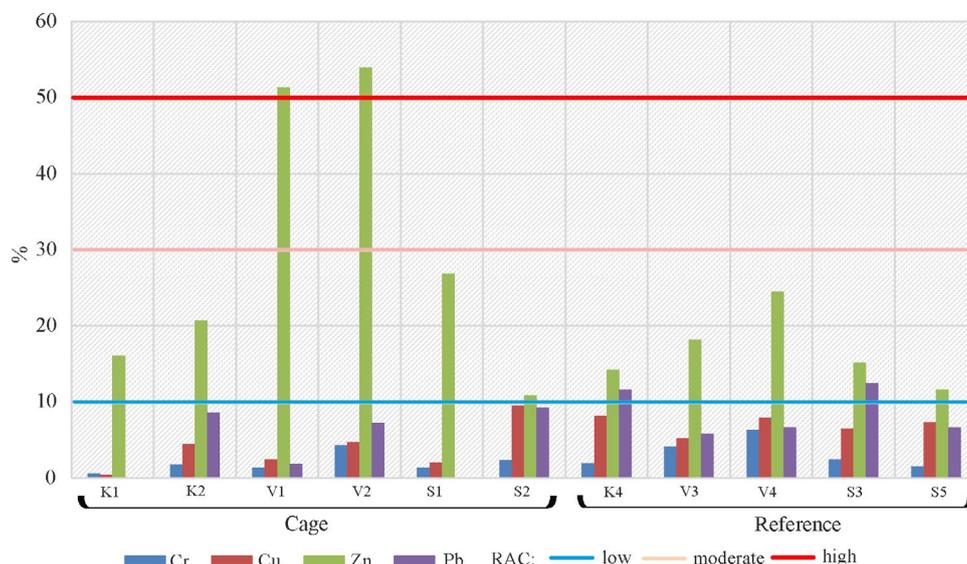
The study revealed key patterns in the accumulation of heavy metals (Cr, Cu, Zn, and Pb) in sediments of Lake Ladoga under the influence of trout cage farms:

1. The primary contributor to sediment contamination was found to be Zn, with concentrations 2 – 4 times higher than references (up to 498 mg/kg). This accumulation is linked to organic waste from farms, particularly in areas with poor water exchange. At long-term cage sites, Zn levels exceeded probable effect concentration (PEC) and mobile forms reached 53%, posing high secondary pollution risks.
2. No significant accumulation of Cu and Pb was observed in cage sediments. This could be due to high Cu assimilation by fish and limited use of antifouling paints. The labile fractions of Cu and Pb remained under 10%, indicating low ecological risk.
3. Elevated Cr levels (up to 133 mg/kg) were recorded in both cage and reference sites, mainly attributed to local geology. Despite exceeding threshold effect concentration (TEC), Cr was mostly found in stable, non-bioavailable forms.

**Table 1.** Comparison of metal content (mg/kg) in sediments of trout farms with water bodies of Karelia and Clarke values.

Parameter	Cr	Cu	Zn	Pb
Farm K				
Average under cages	44.4	39.7	341.7	11.2
Reference average	71.9	35.1	139.3	22.6
PLI*	1.0 – moderate level			
Farm V				
Average under cages	44.5	40.1	498.1	22.2
Reference average	32.8	33.8	152.1	28.1
PLI*	1.2 – moderate level			
Farm S				
Average under cages	133.2	44.0	244.7	16.5
Reference average	103.5	39.4	159.6	17.3
PLI*	1.2 – moderate level			
Northern part of Lake Ladoga (Kirjavalahhti and Impilahti bays) <sup>1</sup>				
Average	62.6	19.1	78.9	16.4
Maximum	104.8	36.5	137.7	23.3
Minimum	31.5	6.3	38.8	11.8
Western part of Lake Ladoga <sup>2</sup>				
Average	53	23.8	116.5	29
Maximum	95.8	45.7	191.1	53.1
Minimum	12.3	4.9	45.7	10
Lakes of the southern part of Karelia <sup>3</sup>				
Average	18	33	95	4.6
Maximum	65	230	424	21.3
Minimum	6	8	29	0.7
Clarke values <sup>4</sup>				
Upper Continental Crust	35	14.3	52	17

**Note:** <sup>1</sup> – (Slukovskiy, 2015); <sup>2</sup> – (Petrova, 2006); <sup>3</sup> – (Slukovskii, 2020); <sup>4</sup> – (Hans Wedepohl, 1995); \* - Pollution load index



**Fig.5.** Percentage of labile forms (% of acid-soluble) in sediments under trout farms at cage and reference sites; RAC – risk level of secondary pollution of the water column.

The results obtained suggest the need for regular Zn monitoring in sediments, especially in long-term cage zones. When designing new farms, hydrological conditions must be taken into consideration. Additionally, national sediment quality standards should be developed to properly assess the impacts of aquaculture.

## Acknowledgements

The authors are sincerely grateful to the management and employees of the trout farms of Lake Ladoga (Parola, Akulovka and Valaam) for logistical assistance in conducting the study.

## Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest.

## Compliance with ethical standards

All applicable ethical standards have been adhered to.

## Funding

The study was carried out within the framework of the State assignment of the Institute of Limnology RAS - St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences on the topic of research No. FFZF-2024-0002 "Modern threats to water bodies and innovative methods of their conservation, restoration and rational use".

## References

Barszcz A.A., Sidoruk M. 2024. Impacts of water management in aquaculture on heavy metal accumulation in rainbow trout muscles and associated health risks from consumption. *Food Control* 164: 110617. DOI: [10.1016/J.FOODCONT.2024.110617](https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2024.110617)

Custodio M., Espinoza C., Orellana E. et al. 2022. Assessment of toxic metal contamination, distribution and risk in the sediments from lagoons used for fish farming in the central region of Peru. *Toxicology Reports* 9: 1603–1613. DOI: [10.1016/J.TOXREP.2022.07.016](https://doi.org/10.1016/J.TOXREP.2022.07.016)

De Andrade Passos E., Alves J.D.P. H., Garcia C.A.B. et al. 2011. Metal fractionation in sediments of the Sergipe River, northeast, Brazil. *Journal of the Brazilian Chemical Society* 22(5): 828–835. DOI: [10.1590/S0103-50532011000500004](https://doi.org/10.1590/S0103-50532011000500004)

Dean R.J., Shimmield T.M., Black K.D. 2007. Copper, zinc and cadmium in marine cage fish farm sediments: An extensive survey. *Environmental Pollution* 145(1): 84–95. DOI: [10.1016/j.envpol.2006.03.050](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.050)

Guzeva A., Lapenkov A., Zaripova K. et al. 2024. Heavy Metal Accumulation in Lake Sediments in the Impact Zone of Trout Cage Farm. *Journal of Fisheries and Environment* 48(1): 136–147. DOI: [10.34044/j.jfe.2024.48.1.12](https://doi.org/10.34044/j.jfe.2024.48.1.12)

Guzeva A., Slukovskii Z., Dauvalter V. et al. 2021. Trace element fractions in sediments of urbanised lakes of the arctic zone of Russia. *Environmental Monitoring and Assessment* 193(6): 378. DOI: [10.1007/s10661-021-09166-z](https://doi.org/10.1007/s10661-021-09166-z)

Guzeva A.V., Elizarova I.R., Lapenkov A.E. et al. 2022. Fractions of trace metals in the sediments of permafrost-affected lakes in Northern Siberia, Lena delta,

Arctic and Antarctic Research 68(2): 160–172. DOI: [10.30758/0555-2648-2022-68-2-160-172](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-160-172)

Hans Wedepohl K. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59(7): 1217–1232. DOI: [10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)

Ji W., Yokoyama H., Fu J. et al. 2021. Effects of intensive fish farming on sediments of a temperate bay characterised by polyculture and strong currents. *Aquaculture Reports* 19: 100579. DOI: [10.1016/J.AQREP.2020.100579](https://doi.org/10.1016/J.AQREP.2020.100579)

Kaya D., Pulatsu S. 2017. Sediment-Focused Environmental Impact of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792) Cage Farms: Almus Reservoir (Tokat). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 17(2): 345–352. DOI: [10.4194/1303-2712-v17 2 13](https://doi.org/10.4194/1303-2712-v17 2 13)

Kucuksezgin F., Pazi I., Gonul L.T. 2022. Environmental impact of fish farming: assessment of metal contamination and sediment geochemistry at three aquaculture areas from the eastern Aegean coast. *Environmental Monitoring and Assessment* 194(4): 1–25. DOI: [10.1007/S10661-022-09960-3](https://doi.org/10.1007/S10661-022-09960-3)

Lall S.P., Kaushik S.J. 2021. Nutrition and Metabolism of Minerals in Fish. *Animals* 11(9): 2711. DOI: [10.3390/ani11092711](https://doi.org/10.3390/ani11092711)

Lapenkov A., Guzeva A., Zaripova K. et al. 2024. Hydrobiological and Geochemical Responses to Trout Cage Aquaculture in Lake Ecosystem. *Limnological Review* 24(4): 593–615. DOI: [10.3390/LIMNOLREV24040035](https://doi.org/10.3390/LIMNOLREV24040035)

Lapenkov A., Guzeva A., Zaripova K. et al. 2023. The seasonal dynamics of geochemical characteristics of sediments in the impact zone of the fish farm (Lake Ladoga, Russia). *Aquaculture and Fisheries* 8(6): 654–660. DOI: [10.1016/j.aaf.2022.09.003](https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.09.003)

Li Y., Duan Z., Liu G. et al. 2015. Evaluation of the possible sources and controlling factors of toxic metals/metalloids in the Florida Everglades and their potential risk of exposure. *Environmental Science & Technology* 49(16): 9714–9723. DOI: [10.1021/ACS.EST.5B01638](https://doi.org/10.1021/ACS.EST.5B01638)

MacDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.A. 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Springer Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 39(1): 20–31. DOI: [10.1007/S002440010075](https://doi.org/10.1007/S002440010075)

Majlesi M., Malekzadeh J., Berizi E. et al. 2019. Heavy metal content in farmed rainbow trout in relation to aquaculture area and feed pellets. *Foods and Raw Materials* 7(2): 329–338. DOI: [10.21603/2308-4057-2019-2-329-338](https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-329-338)

Melo Júnior H. do N., de Paula Filho F.J., Menezes et al. 2023. Impacts of the Residual Trace Metals of Aquaculture in Net Cages on the Quality of Sediment. *Life* 13(2): 338. DOI: [10.3390/life13020338](https://doi.org/10.3390/life13020338)

Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. URL: <https://www.sid.ir/paper/618491/>

Petrova E.A. 2006. Regularities of distribution and forms of occurrence of heavy metals in bottom sediments of Lake Ladoga. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo Universiteta. Nauki o Zemle* [Bulletin of St. Petersburg University. Earth Sciences] 1: 18–29. (in Russian)

Rumyantsev V.A., Drabkova V.G. 2002. Lake Ladoga: Past, Present, Future. (in Russian)

Russell M., Robinson C.D., Walsham P. et al. 2011. Persistent organic pollutants and trace metals in sediments close to Scottish marine fish farms. *Aquaculture* 319(1–2): 262–271. DOI: [10.1016/J.AQUACULTURE.2011.06.030](https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2011.06.030)

Russian Federation Patent No. RU2478114C1. 2011. Multilayer combined antifouling coating providing repellent-chemobiocidal protection. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2478114C1\\_20130327](https://yandex.ru/patents/doc/RU2478114C1_20130327) (in Russian)

Russian Federation Patent No. RU2762722C1. 2021. Grocery feed for trout. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2762722C1\\_20211222](https://yandex.ru/patents/doc/RU2762722C1_20211222) (in Russian)

Slukovskiy Z.I. 2015. Standardization of lithium concentrations of heavy metals in bottom sediments of lakes Ladoga and Chetyrekhverstnoe (Republic of Karelia). *Himiya v Interesah Ustojchivogo Razvitiya* [Chemistry in the Interests of Sustainable Development] 4: 397–408. (in Russian)

Slukovskii Z.I. 2020. Background concentrations of heavy metals and other chemical elements in the sediments of small lakes in the south of Karelia, Russia. *Vestnik MGTU* 23(1): 80–92. DOI: [10.21443/1560-9278-2020-23-1-80-92](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-1-80-92)

State geological map of the Russian Federation scale 1:1000 000 sheets R-35-XXIV, P-36-XIX. 2015. Geomorphological scheme. Third generation. Baltic series. VSEGEI Map Factory, Ministry of Natural Resources of the Russian Federation. Edited by Stepanov. (in Russian)

Suresh G., Ramasamy V., Meenakshisundaram V. et al. 2011. Influence of mineralogical and heavy metal composition on natural radionuclide concentrations in the river sediments. *Applied Radiation and Isotopes* 69(10): 1466–1474. DOI: [10.1016/J.APRADISO.2011.05.020](https://doi.org/10.1016/J.APRADISO.2011.05.020)

Sutherland T.F., Petersen S.A., Leving C.D. et al. 2007. Distinguishing between natural and aquaculture-derived sediment concentrations of heavy metals in the Broughton Archipelago, British Columbia. *Marine Pollution Bulletin* 54(9): 1451–1460. DOI: [10.1016/J.MARPOLBUL.2007.05.010](https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2007.05.010)

Turner A. 2000. Trace Metal Contamination in Sediments from U.K. Estuaries: An Empirical Evaluation of the Role of Hydrous Iron and Manganese Oxides. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 50(3): 355–371. DOI: [10.1006/ECSS.1999.0573](https://doi.org/10.1006/ECSS.1999.0573)

Xie Q., Qian L., Liu S. et al. 2020. Assessment of long-term effects from cage culture practices on heavy metal accumulation in sediment and fish. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 194: 110433. DOI: [10.1016/J.ECOENV.2020.110433](https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2020.110433)

Zaripova K.M., Lapenkov A.E., Guzeva A.V. 2024. Spatio-Temporal Dynamics of Biogenic Element Accumulation in Bottom Sediments in the Trout Farm Impact Zone (Lake Ladoga). *Water Resources* 51(5): 836–843. DOI: [10.1134/S0097807824701094](https://doi.org/10.1134/S0097807824701094)

Zhang Z., Lu Y., Li H. et al. 2018. Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China. *Science of The Total Environment* 645: 235–243. DOI: [10.1016/J.SCITOTENV.2018.07.026](https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.07.026)

Zuyev Y.A., Zueva N.V. 2024. Abundance of Zoobenthos on the Nearshore Slope Near the Rocky Coast of the Island of Valaam (Lake Ladoga) *Inland Water Biology* 17(2): 259–270. DOI: [10.1134/S1995082924020202](https://doi.org/10.1134/S1995082924020202)

# Аккумуляция Cr, Cu, Zn и Pb в донных отложениях Ладожского озера в зоне влияния садковых форелевых хозяйств

Оригинальная статья

LIMNOLOGY  
FRESHWATER  
BIOLOGY

Гузева А.В., Лапенков А.Е.

Институт озерадения Российской академии наук – обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук», ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург, 196105, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Исследование посвящено геоэкологической оценке уровня накопления тяжелых металлов (Cr, Cu, Zn, Pb) в донных отложениях Ладожского озера в зоне влияния трех садковых форелевых хозяйств. Пробы отбирались в конце периода интенсивного кормления рыбы в садковых и контрольных участках. Методом масс-спектрометрии (ИСП МС) проанализированы кислоторастворимые и лабильные формы металлов. Результаты показали, что наибольший уровень накопления характерен для Zn и связан с поступлением органических отходов ферм. Подвижные формы Zn (до 53%) создают высокий риск вторичного загрязнения водной толщи. Для Cu и Pb значимого поступления от форелевых хозяйств не выявлено. Повышенные содержания Cr (до 133 мг/кг) в садковых и контрольных точках связаны преимущественно с природными факторами – геохимическими особенностями пород, слагающих территорию. Интегральный индекс загрязнения (PII) указывал на средний уровень загрязнения, варьируя от 1,0 до 1,2. Результаты подчеркивают необходимость мониторинга содержания Zn в отложениях под садковыми хозяйствами, разработки экологических нормативов для донных отложений, а также учета гидрологических и геохимических особенностей акваторий при планировании рыбоводческих предприятий.

**Ключевые слова:** донные отложения, форелевые хозяйства, тяжелые металлы, аквакультура, Ладожское озеро

Для цитирования: Гузева А.В., Лапенков А.Е. Аккумуляция Cr, Cu, Zn и Pb в донных отложениях Ладожского озера в зоне влияния садковых форелевых хозяйств // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 583-599. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-583

## 1. Введение

В настоящее время аквакультура является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей пищевой промышленности в мире. В России лидирующие позиции по объемам выращиваемой садковой форели (*Oncorhynchus mykiss*) занимает Республика Карелия. В северной части Ладожского озера уже сосредоточено более двух десятков форелевых хозяйств, что вызывает необходимость проведения геоэкологического мониторинга их влияния на состояние озерной экосистемы.

Отходы рыбоводческих ферм, содержащие высокое количество биогенных элементов и микроэлементов, попадают в водную среду и в дальнейшем могут накапливаться в донных отложениях под садками (Kaaya and Pulatsu, 2017; Ji et al., 2021; Custodio et al., 2022; Zaripova et al., 2024). Донные отложения водного объекта являются конечной фазой накопле-

ния химических веществ, однако при изменениях физико-химических параметров среды могут становиться источником вторичного загрязнения водной толщи. Так, при аккумуляции и разложении большого количества органического вещества в отложениях понижаются значения водородного показателя (рН) и окислительно-восстановительного потенциала (Eh), что способствует десорбции металлов из твердофазных компонентов осадков и увеличивает риск миграции ионов в водную среду (Turner, 2000; Guzeva et al., 2021). Растворенные формы металлов способны оказывать токсическое воздействие как на биологические сообщества самого водоема, так и на выращиваемую рыбу.

Уровень и площадь накопления рыбоводческих отходов под садковыми модулями зависит от гидрологических, гидрохимических и геохимических особенностей водного объекта, а также от состава используемых кормов, объема разводи-

\*Автор для переписки.

Адрес e-mail: [lapa13art@gmail.com](mailto:lapa13art@gmail.com) (А.Е. Лапенков)

Поступила: 06 июня 2025; Принята: 06 августа 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

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



мой рыбы и плана мелиоративных работ хозяйства (Федеральный закон РФ от 20.12.2004 N 166-ФЗ). Такие металлы, как Cr, Cu и Zn, являются одними из ключевых микроэлементов рыбных кормов, так как необходимы для полноценного роста и развития форели (Zhang et al., 2018; Lall and Kaushik, 2021). В коммерческих кормах и тканях садковой рыбы также обнаруживаются Pb, Cd и Hg (Majlesi et al., 2019; Barszcz and Sidoruk, 2024). Кроме того, в противообрастательных покрытиях и красках для сетей, а также в составных частях садковых модулей используются компоненты на основе Pb и Cu (Патент РФ № RU2478114C1). Зарубежные исследования показывают, что в донных отложениях в зоне влияния морских и озерных садковых рыбных ферм фиксируются повышенные, по сравнению с контрольными участками, содержания некоторых тяжелых металлов (Fe, Mn, Zn, Cu, Cr, Cd, Pb и Ni) (Sutherland et al., 2007; Russell et al., 2011; Xie et al., 2020; Kucuksezgin et al., 2022; Melo Júnior et al., 2023). В России в настоящее время данные по концентрациям микроэлементов в донных отложениях в районе расположения пресноводных форелевых хозяйств ограничены и не дают полноценной картины об уровне и пространственно-временной динамике данного вида загрязнения. Кроме того, в нормативной базе РФ отсутствует система ПДК (предельно допустимых концентраций) химических веществ для донных отложений, что также усложняет процесс геоэкологической оценки влияния рыбоводческих хозяйств на озерные экосистемы. Ранее проведенное исследование авторов на одном из форелевых предприятий Ладожского озера выявило высокую степень обогащения Zn и Cu поверхностных слоев отложений под садками относительно фоновых значений. Максимальные содержания металлов достигались к концу периода интенсивного кормления рыбы (Guzeva et al., 2024). Полученные результаты, а также дискуссия в научной и производственной среде о влиянии садковых хозяйств на водные объекты обусловили важность продолжения работ и в других прибрежных акваториях Ладоги, используемых в целях аквакультуры.

Цель исследования – геоэкологическая оценка уровня накопления и потенциальной геохимической подвижности Cr, Cu, Zn и Pb в донных отложениях в зоне влияния трех форелевых садковых хозяйств Ладожского озера, которые располагаются в различных по гидрологическим условиям и морфометрическим характеристикам прибрежных бухтах. Результаты выявляют локальные и общие закономерности накопления микроэлементов в донных отложениях форелевых хозяйств, необходимые для разработки системы мониторинга рыбоводческой деятельности и в других регионах РФ.

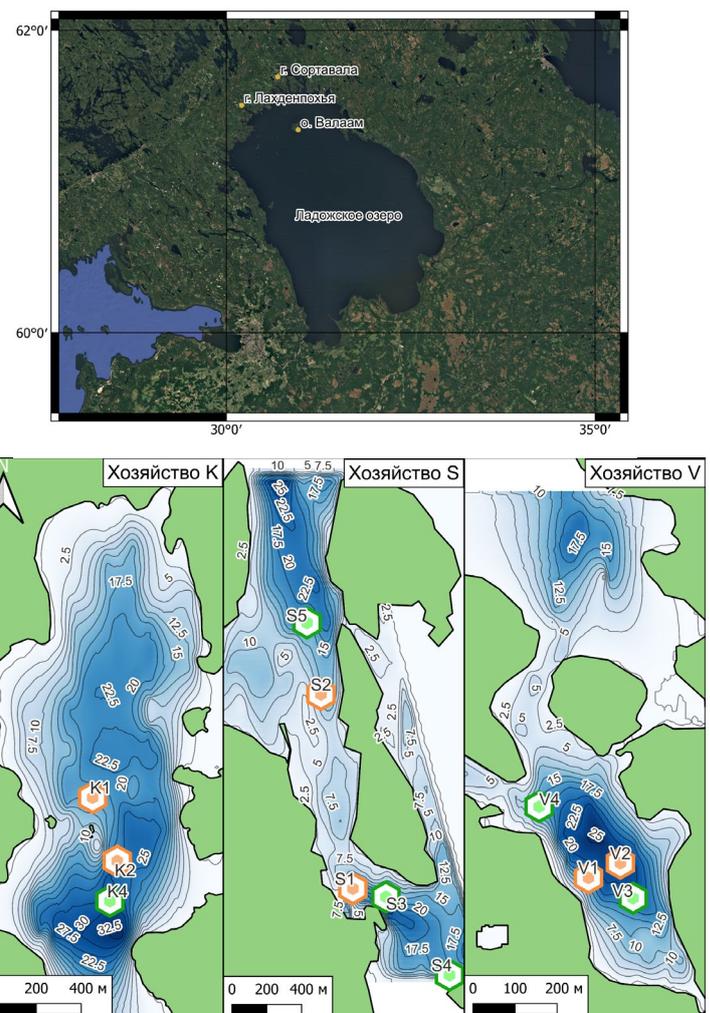
## 2. Материалы и методы

### 2.1. Район исследования

Ладожское озеро (60°50' с. ш., 31°30' в. д.) – крупнейший пресноводный водоем Европы площадью 17 870 км<sup>2</sup> и объемом 848 км<sup>3</sup>, расположенный

на северо-западе России. Северная часть акватории, где проведено исследование, характеризуется сложной морфометрией береговой линии с архипелагами, островами и глубокими заливами, что обеспечивает естественную защиту от ветро-волнового воздействия, создавая оптимальные условия для организации садковых форелевых хозяйств (Румянцев и Драбова, 2002). Район относится к умеренно-континентальной климатической зоне с годовым количеством осадков 650 – 700 мм. Преобладают западные и северо-западные ветры (средняя скорость 4 – 6 м/с), модулирующие волновой режим (высота волн ≤ 1,5 м в открытой части, ≤ 0,5 м в заливах). Толщина льда в зимний период достигает 60 – 80 см, температура придонных слоев стабилизируется на уровне +4 °С. В летний период формируется выраженный термоклин, ограничивающим вертикальный перенос кислорода.

Хозяйство К (Рис. 1) находится в крупном заливе длиной 2,2 км с максимальными глубинами 30 м в районе г. Лахденпохья. Залив соединён с другими заливами 3 протоками шириной 50 – 200 м, обеспечивающих водообмен с открытой частью озера.



**Рис.1.** Батиметрическая схема исследованных рыбоводных участков Ладожского озера (по данным Lapenkov et al., 2024) с точками пробоотбора в районе городов Лахденпохья (хозяйство К) и Sortavala (хозяйство S), а также на о. Валаам (хозяйство V). Оранжевым цветом обозначены садковые точки отбора проб, зеленым – контрольные.

Хозяйство S размещено рядом с г. Сортавала в протоке (шириной 150 – 300 м) между островами с глубинами 10 – 20 м. Данная зона может быть подвержена интенсивным ветровым течениям, способствующим турбулентному перемешиванию водной толщи при северном и южном направлении ветра.

Хозяйство V расположено у берегов о. Валаам в изолированном заливе длиной 820 м с максимальными глубинами под садками 20 – 30 м. Узкие (10 – 15 м) и мелководные (глубина ~5 м) протоки ограничивают водообмен, формируя застойный гидрологический режим (Zuev and Zueva, 2024).

Ветровые течения играют ключевую роль в распределении органического вещества, поступающего от садков. Для хозяйства S характерна высокая энергия течений, приводящая к широкому переносу отходов рыбоводческой деятельности. В хозяйствах K и V преобладают слабые течения, а замкнутая циркуляция способствуют аккумуляции высокоорганических отложений под садками.

## 2.2. Отбор проб

Пробы донных отложений отбирались при помощи гравитационного пробоотборника в конце ноября 2023 года. К началу зимы сезон интенсивного кормления форели завершился, и слой свеженакopленных органических осадков под садками достигал максимальной мощности (Lapenkov et al., 2023; 2024).

На каждом хозяйстве выбирались непосредственно садковые и контрольные участки (Рис. 1). В садковых точках ранее проведенные исследования показали высокие содержания органического вещества в поверхностном слое: в 2 – 7 раз выше фоновых значений (Lapenkov et al., 2024). Контрольные участки располагались на расстоянии 50 – 100 м от крайних модулей. На данном расстоянии содержание органического вещества в поверхностных слоях отложений практически не меняется в течение года и соответствует значениям, характерным для фоновых (нижних) слоев колонок из садковых точек (Lapenkov et al., 2023).

После отбора колонок осадков выполнялось полевое описание литологических особенностей отложений, которое подробно представлено и проиллюстрировано в более ранних работах (Lapenkov et al., 2024). Важно отметить, что донные отложения на трех хозяйствах характеризовались сходным гранулометрическим составом: мягкие глинистые илы с примесью алеврита от 5 до 15%. Пробы помещались в пластиковые пакеты и транспортировались в лабораторию в термостойком контейнере.

## 2.3. Лабораторные анализы

Для анализа содержания металлов был взят слой отложений 0 – 10 см, так как он содержит максимальное количество (масс. %) органического вещества по сравнению с нижними (фоновыми) слоями колонок (Lapenkov et al., 2023). Кроме того,

поверхностные 10 см озерных осадков с экологической точки зрения являются основной средой обитания бентосных организмов.

Для определения содержания металлов анализировались два типа вытяжек из проб донных отложений: кислоторастворимые (70%  $\text{HNO}_3$  + 38%  $\text{HCl}$  + 33%  $\text{H}_2\text{O}_2$ ) и лабильные (1М  $\text{CH}_3\text{CO}_2\text{NH}_4$ , pH 4,8) формы. Методика экстракции и характеристики использованных реактивов подробно указаны в ранее опубликованных работах (Guzeva et al., 2022; 2024) и нормативных документах РД 52.18.289 – 90. В первом случае смесь сильных кислот и перекиси водорода извлекает большую часть ионов металлов, в том числе очень устойчивые формы, которые потенциально могут участвовать в биохимических процессах. Исключение в данном случае составляют нерастворимые алюмосиликатные минералы, однако металлы в их составе мигрируют лишь при механическом переносе твердых частиц осадка. Во втором типе вытяжек извлекаются наиболее подвижные (потенциально биодоступные) ионы металлов, которые находятся в обменно-поглощенной и специфически сорбированной формах. Такие соединения наименее стабильны и при изменениях физико-химических параметров среды (ионный состав вод, pH и Eh среды) могут мигрировать из донных отложений в водную толщу. Все вытяжки из проб донных отложений и холостые пробы готовились в двух параллельных повторностях. Результат принимался в качестве верного, если разница значений для параллельных вытяжек не превышала 20%. Для контроля измерений использовался стандартный образец донного ила озера Байкал «БИЛ-1 – ГСО 7126-94» (Guzeva et al., 2022).

Анализ содержания металлов во всех полученных вытяжках проводился методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ICP-MS) на спектрометре XSeries 2 ICP-MS Thermo Fisher Scientific (Waltham, MA, США) в аналитической лаборатории КарНЦ РАН. Измерения каждого раствора проводились по три раза, затем рассчитывалось среднее значение. Величина среднеквадратического отклонения (в %) для кислоторастворимых форм составила: Cr (0,3 – 2,5), Cu (0,9 – 2,7), Zn (0,2 – 1,9), Pb (0,4 – 2); для лабильных форм: Cr (0,5 – 5), Cu (0,4 – 4), Zn (0,3 – 3), Pb (0,6 – 6).

## 2.4. Статистическая обработка данных

Для массива полученных данных были рассчитаны: среднее значение, медиана и стандартное отклонение. Взаимосвязь поступления металлов с органическими отходами ферм оценивалась по коэффициенту линейной корреляции Пирсона ( $r$ ). Сравнение результатов между садковыми и фоновыми точками проводилось с использованием критерия Краскела-Уоллиса ( $H$ ), применимого для оценки статистической разницы медиан малых выборок ( $n < 30$ ).

Уровень накопления каждого металла по сравнению с фоновыми значениями рассчитывался по коэффициенту геоаккумуляции ( $I_{\text{geo}}$ ), (Muller, 1969):

$$I_{geo} = \frac{C}{1.5 \times B}$$

где  $C$  – концентрация металла в поверхностном слое отложения под садками,  $B$  – фоновая концентрация. Уровень накопления металла в отложениях оценивается по следующей шкале: незагрязненные ( $I_{geo} \leq 0$ ), от незагрязненных до умеренно загрязненных ( $0 < I_{geo} < 1$ ), умеренно загрязненные ( $1 < I_{geo} < 2$ ), от умеренно до сильно загрязненных ( $2 < I_{geo} < 3$ ), сильно загрязненные ( $3 < I_{geo} < 4$ ), от сильно до экстремально загрязненных ( $4 < I_{geo} < 5$ ) или экстремально загрязненные ( $I_{geo} > 5$ ).

Общая оценка степени загрязнения донных отложений под садками на каждом хозяйстве проводилась по интегральному индексу PLI (Pollution Load Index), (Suresh et al., 2011):

$$PLI = (C/F_1 \times C/F_2 \times C/F_3 \dots C/F_n)^{1/n}$$

где  $C/F$  – отношение содержания металла к фоновому значению,  $n$  – число проанализированных элементов. Уровень загрязнения оценивается как низкий ( $PLI < 1$ ), средний ( $1 < PLI < 2$ ), высокий ( $2 < PLI < 3$ ) или экстремально высокий ( $3 < PLI$ ).

Для понимания потенциальной токсичности загрязненных донных отложений для пресноводных гидробиологических сообществ использовалась международная методика SQGs (Sediment quality guidelines), в которой оцениваются измеренные содержания металлов (MacDonald et al., 2000; Li et al., 2015). В данном руководстве для каждого тяжелого металла предусмотрена пороговая (TEC – threshold effect concentration) и потенциально токсичная (PEC – probable effect concentration) концентрация. При содержании металла ниже TEC токсический эффект для живых организмов мало-

вероятен, если значения превышают PEC, то риск оценивается как высокий. Значения TEC/PEC для изученных в работе элементов: Cr – 43,4/111; Cu – 31,6/149; Zn – 121/459; Pb – 35,8/128.

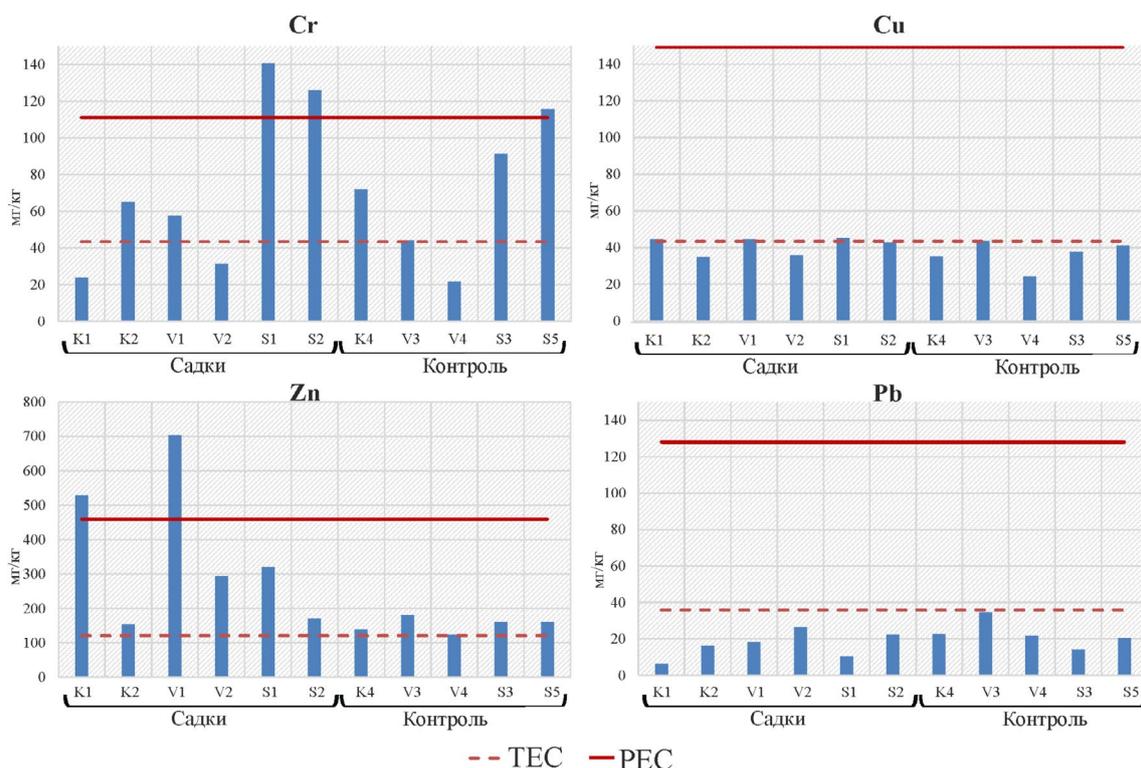
Степень риска вторичного загрязнения водной толщи металлами из донных отложений (геохимическая подвижность) была оценена по индексу RAC (De Andrade Passos et al., 2011), в котором учитывается процентная доля лабильных форм: <1% – отсутствие риска, от 1 до 10% – низкая степень, от 10 до 30% – средняя, от 30 до 50% – высокая, > 50% – очень высокая.

### 3. Результаты и обсуждение

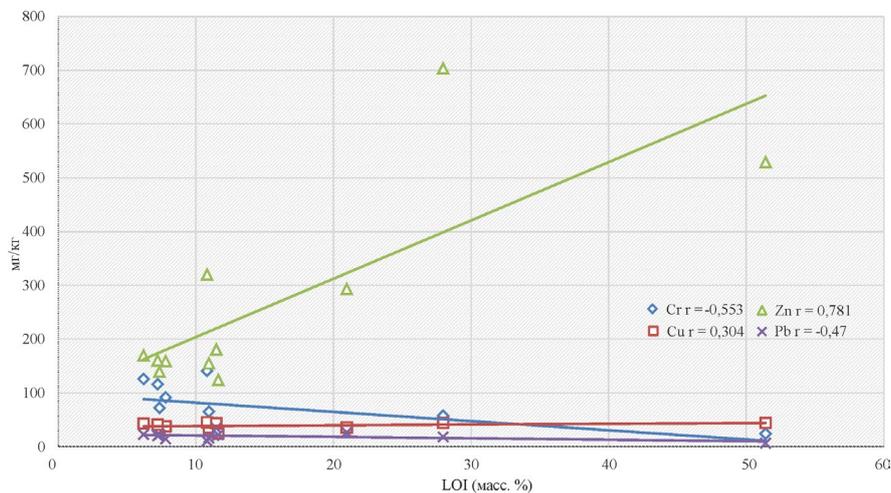
#### 3.1. Уровень аккумуляции тяжелых металлов в донных отложениях под форелевыми хозяйствами

По содержанию кислоторастворимых форм в донных отложениях трех исследованных хозяйств металлы образуют следующий ряд: Zn > Cr > Cu > Pb, результаты представлены на Рис. 2. Корреляционный анализ Пирсона между общим содержанием органического вещества в донных отложениях (по ранее полученным данным из Lapenkov et al., 2024) и исследованными в настоящей работе элементами показан на Рис. 3.

Наиболее тесная связь с органическим веществом выявлена для Zn. Слабая положительная корреляция между данными параметрами также показана для Cu. Следовательно, поступление излишков не усвоенного рыбой Zn в донные отложения под садками происходит преимущественно вместе с органическими отходами ферм, в которых преоб-



**Рис.2.** Содержание кислоторастворимых форм металлов в донных отложения под форелевыми хозяйствами в садковых и контрольных точках. TEC (threshold effect concentration) – пороговая концентрация; PEC (probable effect concentration) – потенциально токсичная концентрация.



**Рис.3.** Корреляция (коэффициент Пирсона  $r$ ,  $\alpha = 0,05$ ) между содержанием кислоторастворимых форм металлов и общим количеством органического вещества (LOI). Значения LOI для слоя отложений 0 – 10 см взяты из ранее опубликованной работы (Lapenkov et al., 2024).

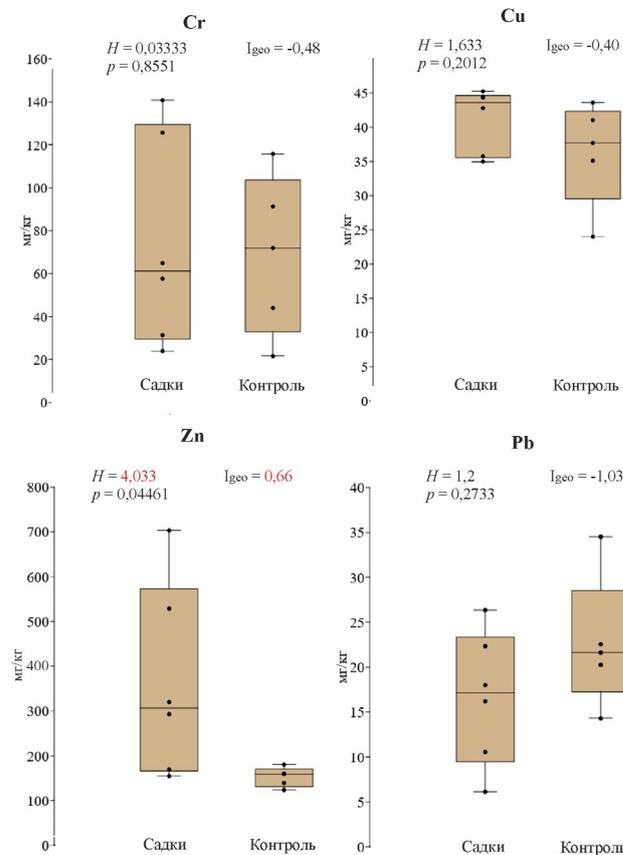
ладают остатки корма и фекалий рыбы. В гораздо меньшей степени органические отходы рыбных хозяйств служат источником Cu, по-видимому, из-за ее более эффективной усвояемости рыбой и более низким содержанием в кормах. Так, в производственных кормах для форели содержится до 600 мг/кг Cu и 10 000 мг/кг Zn (Патент РФ № RU2762722C1). Международные исследования уровня накопления металлов в садковом лососе и донных отложениях выявили, что в водную среду с продуктами выделения рыбы попадает до 87% и 4,3% массы поступающих с кормом Zn и Cu соответственно (Dean et al., 2007).

Для Pb не выявлено статистически значимой связи его поступления в донные отложения с твердыми частицами органического вещества от форелевых ферм. Такие металлы, как Pb и Cu, помимо кормов, могут быть компонентами противобрастательных средств и красок для сетей (Патент РФ № RU2478114C1). Однако результаты указывают на отсутствие накопления металлов в донных отложениях под садками и позволяют предположить низкий уровень практики применения таких составов на рыбоводческих хозяйствах.

Для Cr выявлена значимая отрицательная связь с общим количеством органического вещества в отложениях. Следовательно, содержание данного элемента в отходах садковых ферм низкое и его поступление в донные отложения определяется преимущественно локальными особенностями геологического строения исследуемой территории (см. раздел 3.3).

Статистический анализ различий в содержании металлов между садковыми и контрольными точками трех исследованных хозяйств приведен на Рис. 4. Значимая разница была показана только для Zn, его содержание в садковых точках превосходит контрольные участки в 2 – 3 раза. Для Cu и Pb характерны сходные с фоновыми значениями концентрации. Содержания Cr в контрольных точках на двух изученных хозяйствах оказываются выше, чем в садковых участках, что подтверждает ведущую роль природных геохимических факторов в его поступлении в отложения.

Полученные результаты в целом сходны с другими мировыми исследованиями по относительному уровню накопления Zn в отложениях под садками, а вот для Cu, Pb и Cr показана более благоприятная картина. Так, при исследовании садковых пресноводных ферм по выращиванию тилляпии (*Oreochromis niloticus*) концентрации Zn и Cu в садковых точках по сравнению с фоном были выше в 10 и 2 раза соответственно, а для содержания Cr и Pb находились на уровне контрольных участков (Melo Júnior et al., 2023). В морских лососевых хозяйствах показано превышение контрольных значения для



**Рис.4.** Статистическая диаграмма содержания кислоторастворимых форм металлов в садковых и контрольных точках: значения, среднее и стандартное отклонение.  $H$  - рассчитанное значение критерия Краскела-Уоллиса ( $\alpha = 0,05$ );  $I_{geo}$  – индекс геоаккумуляции.

Zn – в 5 раз, а для Cu – в 10 раз (Dean et al., 2007). В одном из крупных водохранилищ Китая (Changshou reservoir) спустя более 10 лет после завершения функционирования рыбоводческого хозяйства в донных отложениях на месте старых садковых модулей зафиксированы содержания Zn, Cu, Cr и Pb в 2 – 3 раза превосходящие контрольные значения (Xie et al., 2020).

### 3.2. Особенности накопления металлов в отложениях под садковыми форелевыми хозяйствами Ладожского озера

Для выявления влияния природных и антропогенных факторов на накопление металлов в донных отложениях изученных форелевых хозяйств было проведено сравнение содержания Cr, Cu, Zn и Pb с другими частями акватории Ладожского озера (Петрова, 2006; Слукровский, 2015), а также фоновыми (незатронутыми антропогенной деятельностью) озерами южной Карелии (Slukovskii, 2020) и кларковыми значениями (Hans Wedepohl, 1995), результаты представлены в Таблице 1.

В отложениях Ладожского озера фиксируются повышенные содержания Cr: в 2 – 4 раза выше кларковых и в 2 – 5 раз больше средних значений, характерных для озер фоновых территорий южной Карелии. Максимальные концентрации металла наблюдались в хозяйстве S: значения под садками (133 мг\кг) и в контрольной точке (103 мг\кг) близки к максимально встречающимся в Ладожском озере у других авторов (105 мг\кг, Таблица 1). В целом, высокие содержания Cr объясняются особенностями геологического строения территории: вулканиты с литохалькофильной специализацией с повышенным накоплением Co, Bi, Be, Pb, Mg, Ca, Cr и W (Госгеолкарта..., 2015). Таким образом, обильное поступление органических веществ от садков служит фактором «разбавления» природных концентраций Cr в донных отложениях Ладожского озера.

Для озер Карелии, в том числе для Ладоги, характерно превышение (в 2 раза) содержания Cu в донных отложениях относительно кларковых значений. Данный результат, как и в случае с Cr, объясняется геохимической спецификой пород региона, обнаруживающих медно-полиметаллическую специализацию (Госгеолкарта..., 2015). В прибрежных бухтах, занятых для выращивания форели, в донных отложениях зафиксированы концентрации Cu в 2–3 раза превосходящие кларковые значения (Таблица 1).

По Zn средние концентрации с контрольных участков хозяйств (139 – 157 мг\кг) близки к средним величинам, характерным для других частей акватории Ладожского озера (79 – 117 мг\кг) и озер южной Карелии (95 мг\кг), однако все значения превышают кларковые в 2 – 3 раза (Таблица 1). В садковых точках концентрации Zn в 2 – 4 раза выше, чем в отложениях других частей Ладожского озера, а также озер южной Карелии. При этом максимальные содержания элемента в каждом из изу-

ченных хозяйств обнаружены в точках, где располагались самые старые (не перемещающиеся более 10 лет) садковые модули – K1, V1 и S1 (Рис. 2). Следовательно, высокий уровень аккумуляции Zn в отложениях под форелевыми хозяйствами преимущественно связан с деятельностью рыбных предприятий. Наиболее благоприятная ситуация в отношении накопления данного металла в донных отложениях показана для Хозяйства S, рыбоводный участок которого располагается в проливе с лучшими условиями водообмена по сравнению с непроточными закрытыми бухтами Хозяйств K и V.

В фоновых и садковых точках изученных рыбоводческих хозяйств концентрации Pb в отложениях находятся на уровне, характерном и для других районов Ладожского озера, а также озер юга Карелии и кларковых значений (Таблица 1). Содержание Pb в отложениях под форелевыми садками определяется преимущественно природными факторами.

**Таблица 1.** Сравнение содержания металлов (мг\кг) в донных отложениях форелевых хозяйств с водоемами Карелии и кларковыми значениями.

Параметр	Cr	Cu	Zn	Pb
Хозяйство K				
Среднее под садками	44,4	39,7	341,7	11,2
Среднее фоновое	71,9	35,1	139,3	22,6
PLI*	1,0 – средний уровень			
Хозяйство V				
Среднее под садками	44,5	40,1	498,1	22,2
Среднее фоновое	32,8	33,8	152,1	28,1
PLI*	1,2 – средний уровень			
Хозяйство S				
Среднее под садками	133,2	44,0	244,7	16,5
Среднее фоновое	103,5	39,4	159,6	17,3
PLI*	1,2 – средний уровень			
Северная часть Ладожского озера (заливы Кирьявалахти и Импилахти) <sup>1</sup>				
Среднее	62,6	19,1	78,9	16,4
Максимум	104,8	36,5	137,7	23,3
Минимум	31,5	6,3	38,8	11,8
Западная часть Ладожского озера <sup>2</sup>				
Среднее	53	23,8	116,5	29
Максимум	95,8	45,7	191,1	53,1
Минимум	12,3	4,9	45,7	10
Озера южной части Карелии <sup>3</sup>				
Среднее	18	33	95	4,6
Максимум	65	230	424	21,3
Минимум	6	8	29	0,7
Кларковые содержания <sup>4</sup>				
Верхняя часть континентальной коры (Upper Continental Crust)	35	14,3	52	17

**Примечание:** <sup>1</sup> – (Слукровский, 2015); <sup>2</sup> – (Петрова, 2006); <sup>3</sup> – (Slukovskii, 2020); <sup>4</sup> – (Hans Wedepohl, 1995); \* - Pollution load index

### 3.3. Геоэкологическая оценка уровня накопления металлов в зоне влияния садковых форелевых хозяйств Ладожского озера

Для Zn во всех точках зафиксированы концентрации, превышающие пороговый уровень токсичности (ТЕС). В точках с наиболее старыми садковыми модулями (K1 и V1) их содержания превосходят потенциально токсичный уровень (РЕС), Рис. 2. Для данного элемента показано и наибольшее значение  $I_{geo}$  (Рис. 4), характеризующее умеренный уровень загрязнения отложений Zn под садковыми модулями. Важно также отметить, что в большинстве исследованных участков содержание лабильных (потенциально биодоступных) форм Zn варьирует от 12 до 53%, что соответствует средней и даже высокой степени риска вторичного загрязнения водной толщи (Рис. 5) Следовательно, значительная доля Zn закрепляется в донных отложениях исследованных участков в составе слабоустойчивых химических соединений, чувствительных к изменениям физико-химических параметров среды, например к закислению. Кроме того, одними из важнейших сорбирующих металлы минеральными компонентами отложений являются гидроксиды Fe(III), растворяющиеся при снижении окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и восстановлении Fe(III) → Fe(II). Как показали ранее проведенные исследования, в отложениях под садками из-за низкого уровня проточности некоторых участков хозяйств, а также интенсивного поступления органических веществ в течение года преобладают кислые (pH 6.0 – 6.4) восстановительные (бескислородные, Eh < -50 mV) условия (Lapenkov et al., 2024). Таким образом, высокие концентрации Zn под садковыми модулями (особенно выше РЕС) в данных гидрологических и геохимических условиях создают потенциальный экологический риск как для гидробиологических сообществ, так и для товарной рыбы.

Для Cu и Pb содержания кислоторастворимых форм во всех исследованных точках стабильно не превышают пороговой концентрации токсичности (ТЕС) и не создает потенциальных рисков для экосистемы (Рис. 2). Доля лабильных форм не превосходит 10%, что свидетельствует об их устойчивом закреплении в составе осадков и незначительном уровне поступления от садковых хозяйств в донные отложения.

Для Cr характерны содержания, превышающие пороговые концентрации (ТЕС). В Хозяйстве S его содержания, как в садковых, так и контрольных точках превосходят потенциально токсичный уровень (РЕС), Рис. 2. Однако важно отметить, что доля подвижных форм Cr во всех исследованных точках не превышает 7% (низкий уровень риска вторичного загрязнения, Рис. 5). Как обсуждалось ранее, накопление данного элемента в донных отложениях исследуемых рыбоводных участков определяется преимущественно геологическими особенностями территории северной части Ладожского озера, а в составе осадков Cr ассоциирован с устойчивыми потенциально недоступными для живых организмов соединениями.

На трех исследованных форелевых хозяйствах интегральный показатель загрязнения (PLI) принимает значения близкие к 1 (от низкой до умеренной степени), что свидетельствует об относительно благоприятной ситуации в отношении уровня накопления микроэлементов Cr, Cu, Zn и Pb в донных отложениях под садками (Таблица 1).

### 4. Выводы

Проведенное исследование выявило ключевые закономерности накопления тяжелых металлов (Cr, Cu, Zn, Pb) в донных отложениях Ладожского озера в зоне влияния садковых форелевых хозяйств:

1. Наибольший вклад в загрязнение отложений вносит Zn, концентрации которого под садками превышают контрольные значения в 2 – 4 раза

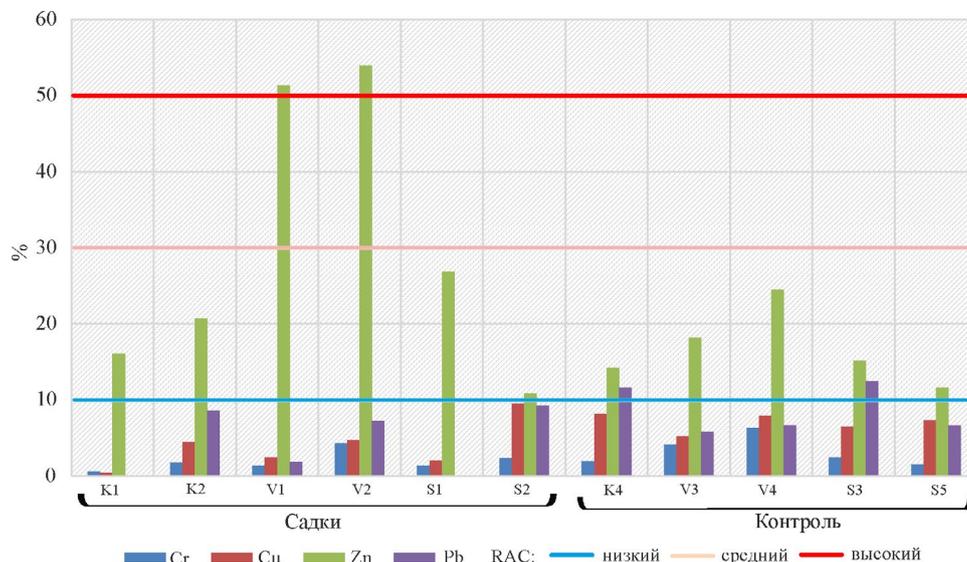


Рис.5. Содержание подвижных форм (% от кислоторастворимых) в донных отложениях под форелевыми хозяйствами в садковых и контрольных точках; RAC – уровень риска вторичного загрязнения водной толщи.

(до 498 мг/кг). Аккумуляция элемента связана с накоплением на дне органических отходов ферм (остатки корма и рыбные фекалии), особенно в условиях слабого водообмена. В зонах длительной эксплуатации садков концентрации Zn превышают потенциально токсичный уровень (РЕС), а доля лабильных форм достигает 53%, создавая высокий риск вторичного загрязнения водной толщи.

- Для Cu и Pb не выявлено значимого накопления элементов в отложениях в садковых точках, что может быть обусловлено высокой усвояемостью Cu рыбой, а также низким использованием противообрастающих покрытий в практике рыбоводческих хозяйств. Потенциальная подвижность (% лабильных форм) для данных элементов оказалась также на низком уровне (<10%), что указывает на отсутствие опасности для живых организмов.
- Повышенные содержания Cr (до 133 мг/кг) в садковых и контрольных точках связаны преимущественно с природными факторами – геохимическими особенностями пород, слагающих территорию Северного Приладожья. Данный металл, несмотря на превышение пороговых значений токсичности (ТЕС), закреплен в устойчивых минеральных формах (подвижность <7%), что минимизирует его потенциальную биодоступность в экосистеме.

Полученные в исследовании результаты позволяют рекомендовать внедрение регулярного мониторинга Zn в донных отложениях рыбных хозяйств, особенно в зонах длительного размещения садков. При проектировании новых хозяйств для минимизации накопления загрязнителей важно учитывать гидрологические особенности используемых акваторий. Для грамотной оценки уровня накопления металлов в зоне влияния рыбоводческих ферм необходимо принимать во внимание геохимическую специфику территории, а также разрабатывать систему ПДК для донных отложений водных объектов.

## Благодарности

Авторы искренне благодарят руководство и сотрудников форелевых хозяйств Ладожского озера (Парола, Акуловка и Валаам) за логистическую помощь в проведении исследования.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

## Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

## Финансирование

Исследование выполнено в рамках Государственного задания ИНОЗ РАН - СПб ФИЦ РАН по теме НИР № FFZF-2024-0002 “Современные угрозы водным объектам и инновационные методы их сохранения, восстановления и рационального использования”.

## Список литературы

Госгеолкарта-200. Листы Р-35-XXIV, Р-36-Х Геоморфологическая схема IX.. Третье поколение Балтийская серия. 2015. Санкт-Петербург: Картфабрика ВСЕГЕИ.

Румянцев В.А., Драбкова В.Г. 2002. Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее.

Петрова Е.А. 2006. Закономерности распределения и формы нахождения тяжелых металлов в донных осадках Ладожского озера. Вестник Санкт-Петербургского Университета. Науки о Земле 1: 18–29.

Патент РФ № RU2478114C1. 2011. Многослойное комбинированное противообрастающее покрытие, обеспечивающее репеллентно-хемобиоцидную защиту. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2478114C1\\_20130327](https://yandex.ru/patents/doc/RU2478114C1_20130327)

Патент РФ № RU2762722C1. 2021. Продукционный корм для форели. URL: [https://yandex.ru/patents/doc/RU2762722C1\\_20211222](https://yandex.ru/patents/doc/RU2762722C1_20211222)

Слуковский З.И. 2015. Нормирование по литию концентраций тяжелых металлов в донных отложениях озер Ладожское и Четырехверстное (Республика Карелия). Химия в Интерессах Устойчивого Развития 4: 397–408.

Barszcz A.A., Sidoruk M. 2024. Impacts of water management in aquaculture on heavy metal accumulation in rainbow trout muscles and associated health risks from consumption. Food Control 164: 110617. DOI: [10.1016/J.FOODCONT.2024.110617](https://doi.org/10.1016/J.FOODCONT.2024.110617)

Custodio M., Espinoza C., Orellana E. et al. 2022. Assessment of toxic metal contamination, distribution and risk in the sediments from lagoons used for fish farming in the central region of Peru. Toxicology Reports 9: 1603–1613. DOI: [10.1016/J.TOXREP.2022.07.016](https://doi.org/10.1016/J.TOXREP.2022.07.016)

De Andrade Passos E., Alves J.D.P. H., Garcia C.A.B. et al. 2011. Metal fractionation in sediments of the Sergipe River, northeast, Brazil. Journal of the Brazilian Chemical Society 22(5): 828–835. DOI: [10.1590/S0103-50532011000500004](https://doi.org/10.1590/S0103-50532011000500004)

Dean R.J., Shimmield T.M., Black K.D. 2007. Copper, zinc and cadmium in marine cage fish farm sediments: An extensive survey. Environmental Pollution 145(1): 84–95. DOI: [10.1016/j.envpol.2006.03.050](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.050)

Guzeva A., Lapenkov A., Zaripova K. et al. 2024. Heavy Metal Accumulation in Lake Sediments in the Impact Zone of Trout Cage Farm. Journal of Fisheries and Environment 48(1): 136–147. DOI: [10.34044/j.jfe.2024.48.1.12](https://doi.org/10.34044/j.jfe.2024.48.1.12)

Guzeva A., Slukovskii Z., Dauvalter V. et al. 2021. Trace element fractions in sediments of urbanised lakes of the arctic zone of Russia. Environmental Monitoring and Assessment 193(6): 378. DOI: [10.1007/s10661-021-09166-z](https://doi.org/10.1007/s10661-021-09166-z)

Guzeva A.V., Elizarova I.R., Lapenkov A.E. et al. 2022. Fractions of trace metals in the sediments of permafrost-affected lakes in Northern Siberia, Lena delta. Arctic and Antarctic Research 68(2): 160–172. DOI: [10.30758/0555-2648-2022-68-2-160-172](https://doi.org/10.30758/0555-2648-2022-68-2-160-172)

Hans Wedepohl K. 1995. The composition of the continental crust. Geochimica et Cosmochimica Acta 59(7): 1217–1232. DOI: [10.1016/0016-7037\(95\)00038-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2)

Ji W., Yokoyama H., Fu J. et al. 2021. Effects of intensive fish farming on sediments of a temperate bay characterised by polyculture and strong currents. *Aquaculture Reports* 19: 100579. DOI: [10.1016/J.AQREP.2020.100579](https://doi.org/10.1016/J.AQREP.2020.100579)

Kaya D., Pulatsu S. 2017. Sediment-Focused Environmental Impact of Rainbow Trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum, 1792) Cage Farms: Almus Reservoir (Tokat). *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 17(2): 345–352. DOI: [10.4194/1303-2712-v17 2 13](https://doi.org/10.4194/1303-2712-v17 2 13)

Kucuksezgin F., Pazi I., Gonul L.T. 2022. Environmental impact of fish farming: assessment of metal contamination and sediment geochemistry at three aquaculture areas from the eastern Aegean coast. *Environmental Monitoring and Assessment* 194(4): 1–25. DOI: [10.1007/S10661-022-09960-3](https://doi.org/10.1007/S10661-022-09960-3)

Lall S.P., Kaushik S.J. 2021. Nutrition and Metabolism of Minerals in Fish. *Animals* 11(9): 2711. DOI: [10.3390/ani11092711](https://doi.org/10.3390/ani11092711)

Lapenkov A., Guzeva A., Zaripova K. et al. 2024. Hydrobiological and Geochemical Responses to Trout Cage Aquaculture in Lake Ecosystem. *Limnological Review* 24(4): 593–615. DOI: [10.3390/LIMNOLREV24040035](https://doi.org/10.3390/LIMNOLREV24040035)

Lapenkov A., Guzeva A., Zaripova K. et al. 2023. The seasonal dynamics of geochemical characteristics of sediments in the impact zone of the fish farm (Lake Ladoga, Russia). *Aquaculture and Fisheries* 8(6): 654–660. DOI: [10.1016/j.aaf.2022.09.003](https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.09.003)

Li Y., Duan Z., Liu G. et al. 2015. Evaluation of the possible sources and controlling factors of toxic metals/metalloids in the Florida Everglades and their potential risk of exposure. *Environmental Science & Technology* 49(16): 9714–9723. DOI: [10.1021/ACS.EST.5B01638](https://doi.org/10.1021/ACS.EST.5B01638)

MacDonald D.D., Ingersoll C.G., Berger T.A. 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems. *Springer Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 39(1): 20–31. DOI: [10.1007/S002440010075](https://doi.org/10.1007/S002440010075)

Majlesi M., Malekzadeh J., Berizi E. et al. 2019. Heavy metal content in farmed rainbow trout in relation to aquaculture area and feed pellets. *Foods and Raw Materials* 7(2): 329–338. DOI: [10.21603/2308-4057-2019-2-329-338](https://doi.org/10.21603/2308-4057-2019-2-329-338)

Melo Júnior H. do N., de Paula Filho F.J., Menezes et al. 2023. Impacts of the Residual Trace Metals of Aquaculture in Net Cages on the Quality of Sediment. *Life* 13(2): 338. DOI: [10.3390/life13020338](https://doi.org/10.3390/life13020338)

Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. URL: <https://www.sid.ir/paper/618491/>

Russell M., Robinson C.D., Walsham P. et al. 2011. Persistent organic pollutants and trace metals in sediments close to Scottish marine fish farms. *Aquaculture* 319(1–2): 262–271. DOI: [10.1016/J.AQUACULTURE.2011.06.030](https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2011.06.030)

Slukovskii Z.I. 2020. Background concentrations of heavy metals and other chemical elements in the sediments of small lakes in the south of Karelia, Russia. *Vestnik MGTU* 23(1): 80–92. DOI: [10.21443/1560-9278-2020-23-1-80-92](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2020-23-1-80-92)

Suresh G., Ramasamy V., Meenakshisundaram V. et al. 2011. Influence of mineralogical and heavy metal composition on natural radionuclide concentrations in the river sediments. *Applied Radiation and Isotopes* 69(10): 1466–1474. DOI: [10.1016/J.APRADISO.2011.05.020](https://doi.org/10.1016/J.APRADISO.2011.05.020)

Sutherland T.F., Petersen S.A., Leving C.D. et al. 2007. Distinguishing between natural and aquaculture-derived sediment concentrations of heavy metals in the Broughton Archipelago, British Columbia. *Marine Pollution Bulletin* 54(9): 1451–1460. DOI: [10.1016/J.MARPOLBUL.2007.05.010](https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2007.05.010)

Turner A. 2000. Trace Metal Contamination in Sediments from U.K. Estuaries: An Empirical Evaluation of the Role of Hydrous Iron and Manganese Oxides. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 50(3): 355–371. DOI: [10.1006/ECSS.1999.0573](https://doi.org/10.1006/ECSS.1999.0573)

Xie Q., Qian L., Liu S. et al. 2020. Assessment of long-term effects from cage culture practices on heavy metal accumulation in sediment and fish. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 194: 110433. DOI: [10.1016/J.ECOENV.2020.110433](https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2020.110433)

Zaripova K.M., Lapenkov A.E., Guzeva A.V. 2024. Spatio-Temporal Dynamics of Biogenic Element Accumulation in Bottom Sediments in the Trout Farm Impact Zone (Lake Ladoga). *Water Resources* 51(5): 836–843. DOI: [10.1134/S0097807824701094](https://doi.org/10.1134/S0097807824701094)

Zhang Z., Lu Y., Li H. et al. 2018. Assessment of heavy metal contamination, distribution and source identification in the sediments from the Zijiang River, China. *Science of The Total Environment* 645: 235–243. DOI: [10.1016/J.SCITOTENV.2018.07.026](https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.07.026)

Zuyev Y.A., Zueva N.V. 2024. Abundance of Zoobenthos on the Nearshore Slope Near the Rocky Coast of the Island of Valaam (Lake Ladoga) *Inland Water Biology* 17(2): 259–270. DOI: [10.1134/S1995082924020202](https://doi.org/10.1134/S1995082924020202)