

Changing the appearance of underwater landscapes in the coastal zone of a large freshwater body under the influence of trout farming activities: a case study of Mustalakhti Bay, Lake Ladoga

Dudakova D.S., Lapenkov A.E., Anokhin V.M., Guzeva A.V., Zaripova K.M.

Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, SPC RAS, Sevastyanova str., 9, St. Petersburg, 196105, Russia

ABSTRACT. In Mustalakhti Bay of Lake Ladoga, which is used for placing trout farms, a study was conducted on the structure of bottom landscapes and the transformation of the lakebed surface under the influence of aquaculture activities. Field data for mapping bottom landscapes were collected using hydroacoustic surveys with the SOLIX 10 SI MEGA CHIRP side-scan sonar and underwater photography with the Limnoscout ROV. Standard sedimentological and biological studies of the lakebed were also carried out. The identification of distinct facies elements was based on morphometric features (depth zones, bottom slopes in different parts of the bay, and terrain elements), characteristics of bottom sediments (sediment type, fluid mud composition), surface appearance, and benthic biological communities (dominant benthic groups, presence/absence of macrophytes). The study resulted in bathymetric and landscape maps of the investigated bay, highlighting the characteristic features of individual landscape facies. A total of 8 facies were identified. The study demonstrated a significant negative impact of trout farms on the bay's bottom. This is confirmed by: 1. substantial changes in the lakebed appearance detected through video footage; 2. visual changes in the surface observed in acoustic images (sonograms) from the side-scan sonar; and 3. increased sediment thickness and higher accumulation of organic matter, evidenced by sonar data and previously conducted chemical analyses of sediments in the farm areas. The data indicates that the features of the bay's basin, specifically its steep slopes and the extensive shallow area with relatively large depths (20-35 m), create conditions for the accumulation of anthropogenically transformed sediments within the farm area and extending outwards by several tens of metres (a 100 m diameter zone around each farm). **Conclusion:** The use of a landscape approach with modern research tools, including acoustic and underwater photography, has provided a spatial assessment of the impact of trout farming on the condition of the studied section of the freshwater body.

Keywords: bottom landscapes, Lake Ladoga, cage fish farms, mapping, side-scan sonar (SSS), Limnoscout ROV

For citation: Dudakova D.S., Lapenkov A.E., Anokhin V.M., Guzeva A.V., Zaripova K.M. Changing the appearance of underwater landscapes in the coastal zone of a large freshwater body under the influence of trout farming activities: a case study of Mustalakhti Bay, Lake Ladoga // *Limnology and Freshwater Biology*. 2024. - № 6. - P. 1503-1524. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1503

1. Introduction

Currently, one of the significant issues related to negative environmental changes, particularly concerning aquaculture facilities, is the pollution of freshwater bodies with organic matter and trace elements, which can affect the trophic state of the water body, negatively impact biological communities, and cause ecosystem alterations (Ryzhkov et al., 2011; Milyanchuk et al., 2019; Dudakova et al., 2024; Guzeva et al., 2024; Lapenkov et al., 2023; Zaripova et al., 2024). The study of this issue is much more advanced for marine aquacul-

ture activities (Kalantzi and Karakassis, 2006; Rooney and Podemski, 2009; Villnäs et al., 2011; Farabi et al., 2022; Elvines et al., 2024).

The methods used to study such impacts typically rely on standard approaches in hydrochemical, hydrobiological, and sedimentological research (Carroll et al., 2003; Lapenkov et al., 2023). However, for purposes such as mapping benthic habitats, quantitatively assessing biological resource stocks, studying benthic landscapes, and identifying anthropogenic transformations of the substrate and spatially assessing ongoing changes, remote sensing methods are now widely used

*Corresponding author.

E-mail address: judina-d@yandex.ru (D.S. Dudakova)

Received: September 18, 2024; **Accepted:** December 02, 2024;

Available online: December 25, 2024

© Author(s) 2024. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



alongside traditional methods (Fish and Carr, 1990; Cochrane and Lafferty, 2002; Quintino, 2003; Harris and Baker, 2012; Foster et al., 2009; Che Hasan et al., 2014). Among the latest methods, one of the most effective is hydroacoustic technology, which involves the use of classical single-beam and multi-beam echosounders as well as side-scan sonar (SSS). Overall, the use of multi-beam echosounders and side-scan sonar in the field of aquaculture is primarily focused on monitoring fish in cages and assessing their stocks (Kristmundsson et al., 2023; Ridgway et al., 2024). The application of these methods for assessing changes in the condition of the substrate beneath the cages has not been sufficiently developed (Dougall and Black, 2001; Andrés, 2011).

Objective of the study: To assess the impact of cage aquaculture facilities on the condition of underwater landscapes in a large freshwater body using modern remote sensing methods.

2. Material and methods

2.1. Study area

The research was conducted in the Mustalahti Bay (in the skerries of the Yakimvarsky Bay) of Lake Ladoga, near the town of Lahdenpohja (Fig. 1). The bay covers an area of approximately 2.2 km², is elongated in a submeridional direction, and has a total length of 2.4 km.

In this bay, fish farming facilities are operated by «Akulovka» LLC. According to satellite images, the first fish cages appeared in the bay in 2011. On average, the fish farm produces 1000 tons of fish per year. A distinctive feature of trout farming is the seasonal variation in feeding intensity, which is influenced by water temperature. In winter, when temperatures are low, the amount of feed is minimal. With the onset of spring and throughout the summer, it increases, and by the end of autumn, it gradually decreases. In August, during the peak feeding season, the total feed input into the cages ranges between 6 and 10 tons per day (Dudakova et al., 2024).

The research was conducted on 1 March 2023, 6 July 2023, and 24-25 July 2024.

2.2. Research methods

The landscape studies of the bay's lakebed were based on echo sounding, underwater video recording, and acoustic scanning of the bottom using side-scan sonar (SSS), as well as bottom sampling to examine the sediments and biota of this area.

For the purpose of identifying the structure of the underwater terrain, echo sounding was conducted. The Hummingbird SOLIX 10 SI MEGA CHIRP sonar was used. During the series of passes, digital depth recordings were made. The creation of a digital bathymetric model from the obtained digital data was carried out using Surfer 9 and ArcMap 10.5 software. Depth measurement points with coordinate references in the WGS-84 system were recorded in Excel tables from the sonar readings. To extract coordinates of zero depths for constructing the bathymetric map, the shoreline contours were traced in Google Earth Pro, converted via a KMZ file to a shapefile, and then extracted into Excel tables in ArcMap. For a clearer representation in the map construction, additional land points with positive elevation values were included. The total dataset was analyzed to identify and exclude sonar measurement points that did not conform to the overall distribution patterns; these outliers were likely due to anomalous conditions affecting the instrument. The digital terrain model was created in raster format using the Natural Neighbor method. Based on the digital raster terrain model, various morphometric maps were generated using GIS tools: slope angle (Slope), azimuth of maximum slope (Aspect), and cross-sections of the lake bed profiles. For a clearer representation, the maps were created in the rectangular coordinate system Pulkovo 1942, zone 6, which required converting degree geographic coordinates (x, y WGS-84) into meter coordinates. Three-dimensional terrain models were constructed using Surfer 9 software.

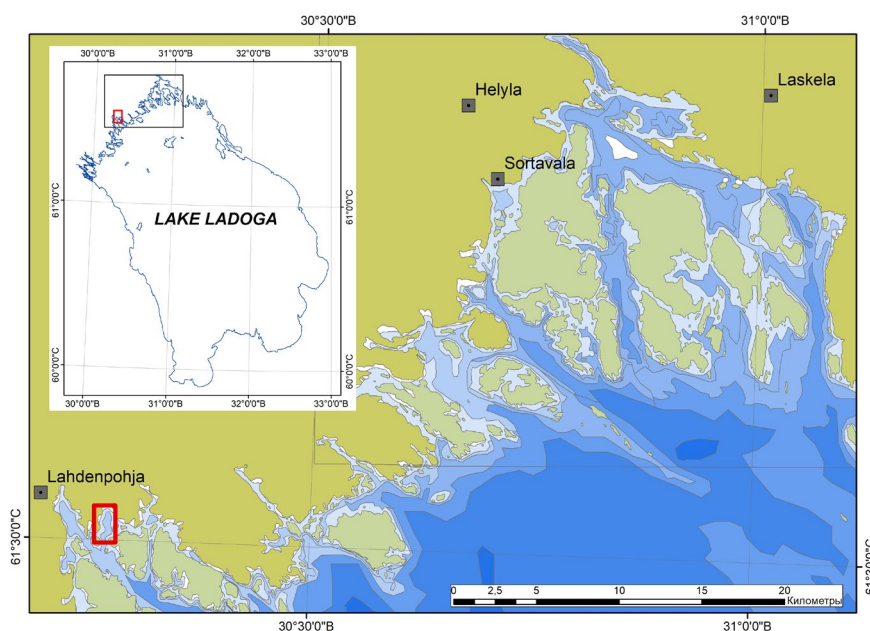


Fig.1. Location of the study area (Mustalahti Bay) in Lake Ladoga.

For underwater video recording, a remotely operated underwater vehicle (ROV) Limnoscout was used, developed for the conditions of Lake Ladoga (Dudakova et al., 2021). Its application in the study of underwater landscapes in Lake Ladoga involved video profiling of the lake bed over sections up to 1 km long, with parallel depth and track reference. The ROV was passively towed close to the lakebed surface (10-20 cm) using the screen effect. The resulting images had a bed coverage width of approximately 50-100 cm per frame. Video recording in areas where fish farming components are located was challenging due to numerous lines, ropes, and anchoring elements (concrete blocks) used for securing the cages. Consequently, the approach used under normal video profiling conditions with direct profile passes was modified to involve recording short segments in different parts of the bay. In the cage areas, filming was conducted directly from the cages, with the camera passing over the lakebed and controlled from the cage platforms.

For large-area surveys of the lakebed, acoustic scanning was conducted using a side-scan sonar (Hummingbird SOLIX 10 SI MEGA CHIRP). The acoustic surveys produced a series of sonograms showing images of different types of the lakebed and individual objects on it. Analysis of parallel strips of sonogram mosaics (acoustic profiles) allows for the identification of elements on various types of lakebed with spatial reference and helps delineate boundaries between distinct landscape units. The sonograms used for mosaic construction were obtained in a mode that displayed the water column, allowing for simultaneous assessment of changes in the lakebed characteristics with varying depths. Data on changes in the surface layer of sediments, obtained through hydroacoustic scanning with a lower beam sonar in low-frequency mode (455 MHz), were also used.

The main criteria for delineating facies boundaries within the study bay were geomorphological and sedimentary. Geomorphological features were analyzed based on data from the digital bathymetric model obtained during the bathymetric survey. Parameters such as lakebed slope and aspect were calculated. The type of soft bottom sediments was determined by sampling them using a DAC250 bottom grab. During the 2023-2024 period, 25 sites were studied (Fig. 2). Visual surveys were conducted, along with the description and assessment of the thickness of various layers of bottom sediments, as well as their classification based on the proportion of different grain size fractions through visual and organoleptic evaluation (Instructions..., 1995). Special attention was given to the thickness of the organic layer observed in the cage impact zone. The biological data on the bottom landscapes are based on the assessment of the state of macrozoobenthos from bottom sampling conducted on July 24, 2024 (Fig. 2: sites B24_1 to B24_21), as well as seasonal sampling conducted at four sites in 2023 (Fig. 2: sites Koko 3, 4', 5, and 6'). Standard methods accepted in hydrobiology were applied in the collection and processing of benthos (Methodological Recommendations..., 1983). The bottom sediment samples for the study of zoobenthos

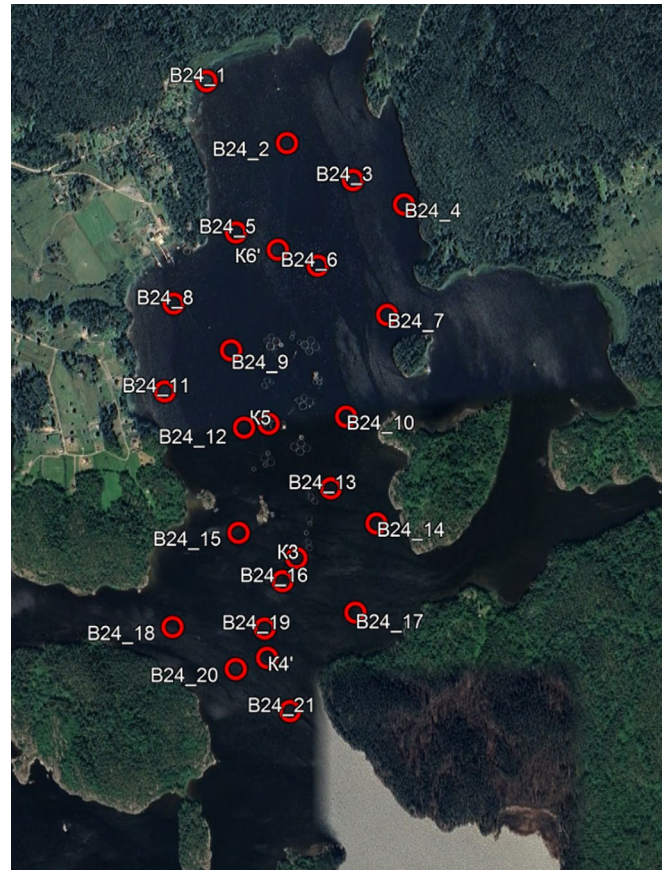


Fig. 2. Locations of sampling sites.

were collected using a DAC-250 box-type grab sampler (Ekman-Birge modification with a sampling area of 1/40 m²). To assess the role of individual taxa in bottom landscapes, the community structure and composition of the dominant complex were evaluated. Acoustic data on the occurrence and number of fish acoustic signals obtained from the echo sounder were used to assess the distribution of ichthyofauna during the study period. Since the activity and density of ichthyofauna influence the nature of the bottom surface, these characteristics were also considered when evaluating the condition of bottom landscapes according to biological criteria.

In the analysis of the feature set, distinct facies were identified within the landscape structure of the studied part of the water body, and as a result, a digital model of the bottom landscapes of the bay was created. Using this model, the areas occupied by different facies were assessed, and the proportion of anthropogenically altered water areas was calculated.

3. Results and discussion

3.1. Features of the bay basin

Based on the constructed digital elevation model, the characteristics of Mustalakhiti Bay have been calculated. The average depth is 12.9 meters, with a maximum depth of 36 metres. As shown in the obtained bathymetric map, the maximum depths are shifted towards the southern open part of the bay (Fig. 3: A). Although the bay generally extends in a sublatitudinal direction, there are several complicating features in the terrain, including elevations in the perpendicular

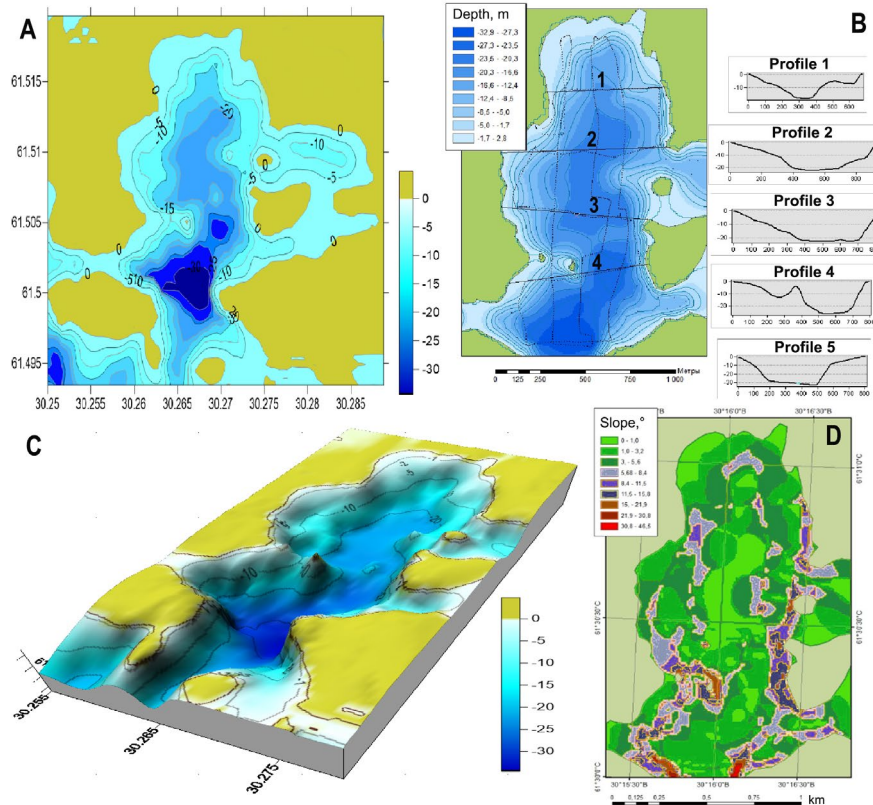


Fig.3. Bathymetric map of Mustalahti Bay based on echo sounding data: A – Two-dimensional bathymetric map; B – Cross-sectional profiles of the bottom terrain; C – Three-dimensional model of the bottom terrain; D – Bottom slope map.

direction. This is related to the geological characteristics of the area (Fig. 4). In geological terms, the area is composed of the Ikkulsk and Kukhmin formations of the Lahdenpohja metamorphic complex (State geological map..., 2015). In the western part of the bay, the Ikkal Formation of graphite-biotite gneisses and diopside skarns is located. This development area is marked by a positive Ta anomaly based on magneto-

metric data (Zuikova and Shilova, 2000), which is associated with the presence of pyrrhotite and magnetite. The magnetic susceptibility of the rocks in the Ikkal Formation is noticeably higher than that of the rocks in the Kukhmin Formation. To the east of the bay, the Kukhmin Formation primarily consists of stigmatised garnet-biotite gneisses, and the contacts between metamorphic rocks of different formations are tectonized.

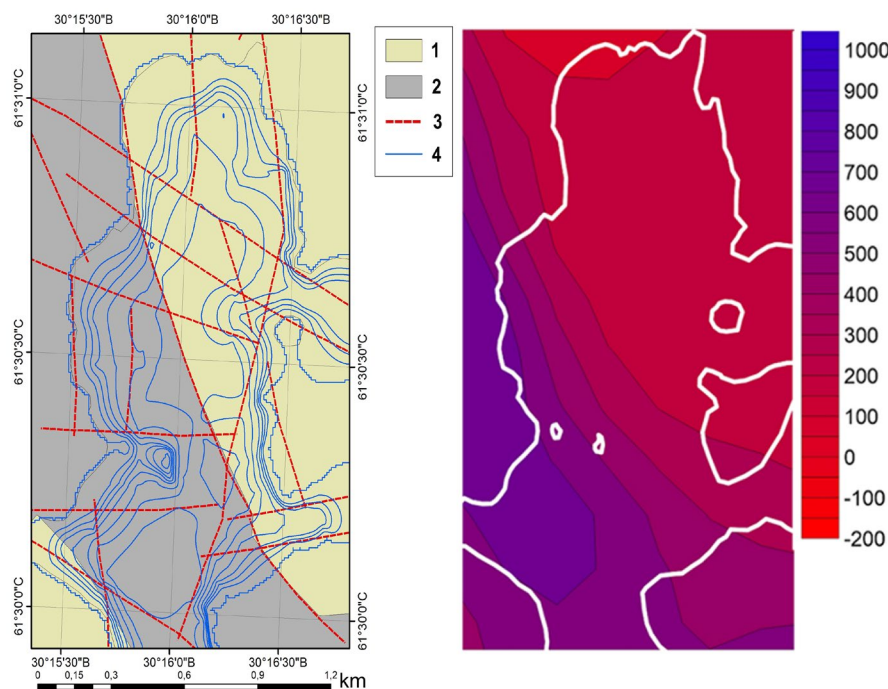


Fig.4. Geological map of the area and anomalous magnetic field map (nT) (digitized from data: State Geological Map, 2015; Zuikova and Shilova, 2000).

Note: 1. – Kukhmin Formation – migmatized garnet-biotite gneisses; 2. – Ikkal Formation – graphite-biotite gneisses; 3. – Faults; 4. – Isobaths.

Carbon-bearing gneisses exhibit a copper-polymetallic specialisation, which may explain the presence of anomalies in copper and zinc in the bay's bottom sediments, as identified during an investigation of the sediments in the area of the trout farming facility in Mustalakti Bay (Guzeva et al., 2024). Faulting defines the fine block structure of different parts of the bay and is highlighted by steep slopes with submeridional and northeast orientations (Fig. 4). Overall, the bay features a trough-like basin with steep slopes along its sides and a relatively flat, level bottom in the center (Fig. 3B). The western rim is more gently sloping compared to the eastern rim (Fig. 3C). An important feature is the uplift of the bottom in a submeridional direction in the southern part, which hampers water exchange with the southern portion of the water body and affects sediment distribution. The eastern and western rims of the bay's basin have significant bottom uplifts that hinder water mixing within the bay and the movement of bottom sediments. These underwater uplifts obstruct sediment exchange between individual basins, making them distinctive sedimentary reservoirs for local pollution sources.

3.2. Bottom sediments and underwater landscapes of Mustalakti Bay

In Mustalakti Bay, five types of natural loose bottom sediments have been identified: fine-grained sand, aleuritic silt, clayey silt, clayey silt with an aleurite admixture, and an additional type formed due to

anthropogenic activity—intense organic matter accumulation: clayey silt with an aleurite admixture, with a thick layer of silt contaminated with organic matter (Fig. 5). The bedrock forms the walls of the basin and island elevations, extending down to depths of 15-20 meters. The majority of the bay's bottom is composed of clayey silts with an aleurite admixture (aleuripelites), both natural and with an increased sediment layer rich in organic matter.

Most of the bottom in the bay (as well as throughout Lake Ladoga) is covered with what is known as a fluid mud layer – a surface layer of highly water-saturated sediment with a fluid consistency, with a thickness of 2-4 cm. This fluid mud layer is typically composed of silt with a significant amount of sand particles. The silt admixture constitutes 10-30%. It usually contains up to 5% of fine-grained sand. The layer is in the aeration zone and represents the most active area of benthic life. To some extent, the fluid mud layer can be compared to the soil layer on land. In the skerry part of Lake Ladoga, the age of fluid mud does not exceed 10 years, as the sedimentation rate varies from 1 to 2 mm per year (Semenovich, 1966; Subetto et al., 2002). Under fishery cages and at some distance from them, abnormally large thicknesses of fluid mud (up to 18 cm) are observed, often enriched with organic matter. Beneath the fluid mud layer, the majority of the bay's bottom is covered with clayey silts, with some silt admixture. Typically, this sediment is gray with a yellowish tint, soft, viscous, with some compaction downward, often with dark streaks of organic matter.

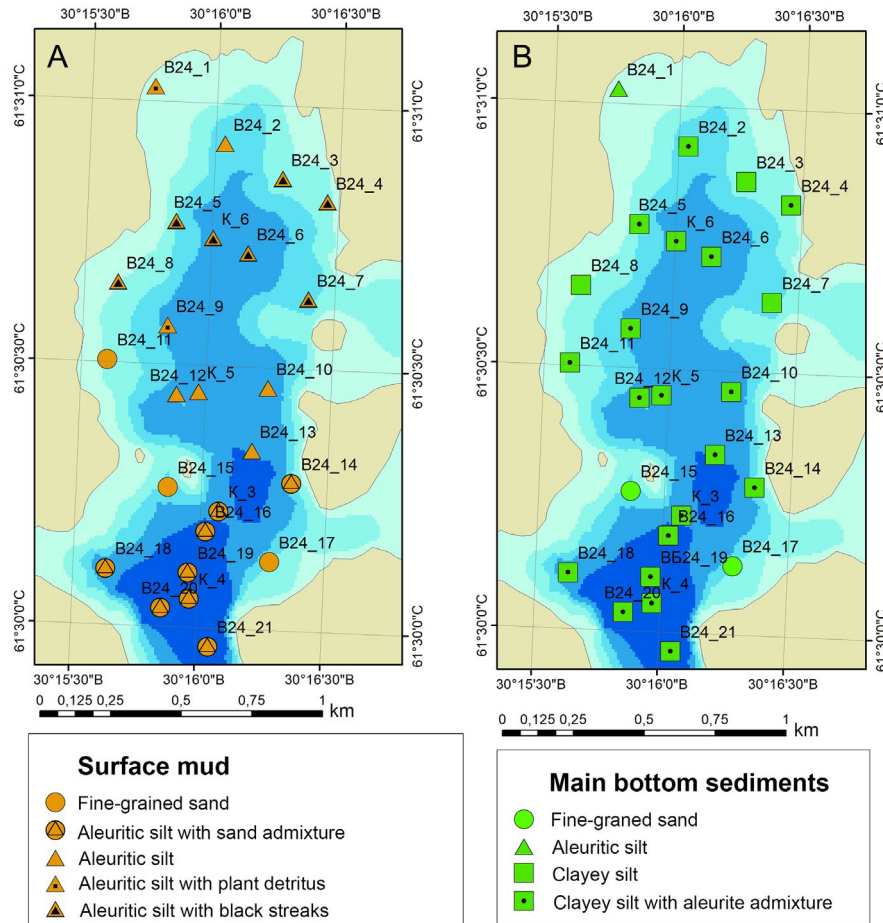


Fig.5. Distribution of bottom sediment types based on the composition of fluid mud (A) and the main sediment beneath the fluid mud (B) in Mustalakti Bay at the studied sites.

A sandy bottom is not typical for the studied area of the water body. In samples from depths up to 3 meters, fine-grained sand was identified only at two sites in the southwestern and southeastern parts (Fig. 5: sites B24_15 and B24_17). Acoustic survey data also confirmed the absence of extensive areas composed of sandy soil. Colluvium at the base of rock outcrops was also virtually absent. The coverage of intact rocky ledges by loose sediments is a characteristic feature of all coastal areas along the shoreline (Fig. 6). Colluvium was noted only in the area of the southwestern uplift at the foot of two small islands.

Acoustic survey (Fig. 7) revealed that in areas with unaltered bottom sediments, primarily composed of clayey silts with an aleurite admixture, two zones were distinguished based on depth and the presence of woody debris on the surface: one zone, down to a depth of 5 meters, where submerged tree trunks were consistently observed (additional biotope elements that increase spatial complexity and biological diversity), and a second zone, below these depths, characterized by a levelled and «empty» bottom (Fig. 8A).

A distinct type of lakebed surface was characterised by an increased layer of organic matter, distributed in patches. Low-frequency acoustic profiles indicated an increase in the thickness of soft sediments due to the enhanced accumulation of fluid mud, as previously mentioned. The cores of these «patches» were located beneath the fish cages. Acoustic surveys allowed for an assessment of the extent of such sediment distribution. In the sonograms, these areas appeared in a lighter tone (Fig. 9). The diameter of these patches extended up to 100 metres from the centre of the fish cage.

The comprehensive analysis of the collected data enabled the creation of a landscape map (Fig. 10). Eight landscape facies have been identified within the studied bay.

The overgrowth of shallow areas in the bay by macrophytes (Facies 1) is very minimal and is only noted on a relatively significant scale in the southern corner of the bay. Macrophyte-dominated habitats are characterized by more intensive development of benthic biota and greater species diversity compared to areas without vascular aquatic plants. Overall, this facies covers no more than 4.5% of the bay's bottom area.

The slopes of the lake basin with the steepest inclines (mainly in the eastern part of the bay) represent a distinct element of the landscapes of the studied water area (Facies 2). These slopes are composed of bedrock with a thin layer of soft sediments in the depressions. This facies is characterized not only by eurytopic benthic groups found in shallow areas (such as oligochaetes, chironomids, water mites, isopods, and amphipods), but also by the presence of zooperiphyton groups of benthic invertebrates, particularly sponges and bryozoans, which are associated with hard substrates; the presence of gastropods. The estimated proportion of Facies 2 is 15% of the total area.

In the shallow areas up to 5 meters deep in the western, more gently sloping part of the bay (Facies 3), the bottom is composed of various types of sediments (sand, silty aleurite, clayey silt, clayey silt with an aleurite admixture), which increases the mosaic nature of the biotopes forming within this facies. The spatial complexity of the bottom surface is enhanced by submerged tree trunks at these depths. The development of the benthic biota is characterised by relatively high quantitative indicators. Dominant taxa include groups associated with the littoral zone (large bivalves, caddisflies), as well as eurytopic taxa (oligochaetes, chironomid larvae). Facies 3 covers approximately 10% of the total area of the bay.

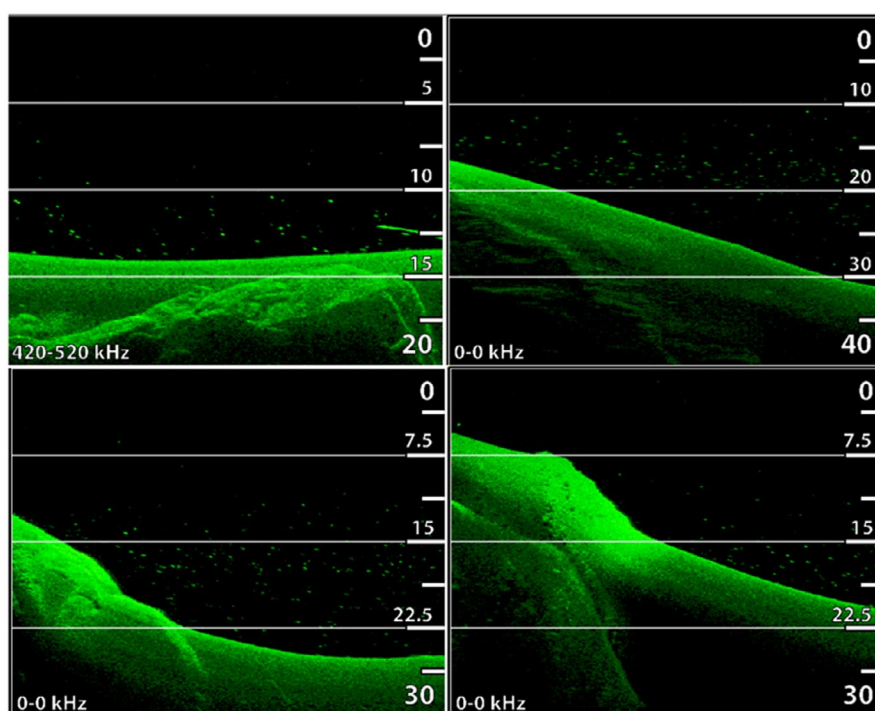


Fig.6. Boundary between bedrock and loose sediments based on acoustic images from a high-frequency downward beam echosounder with a DTL function.

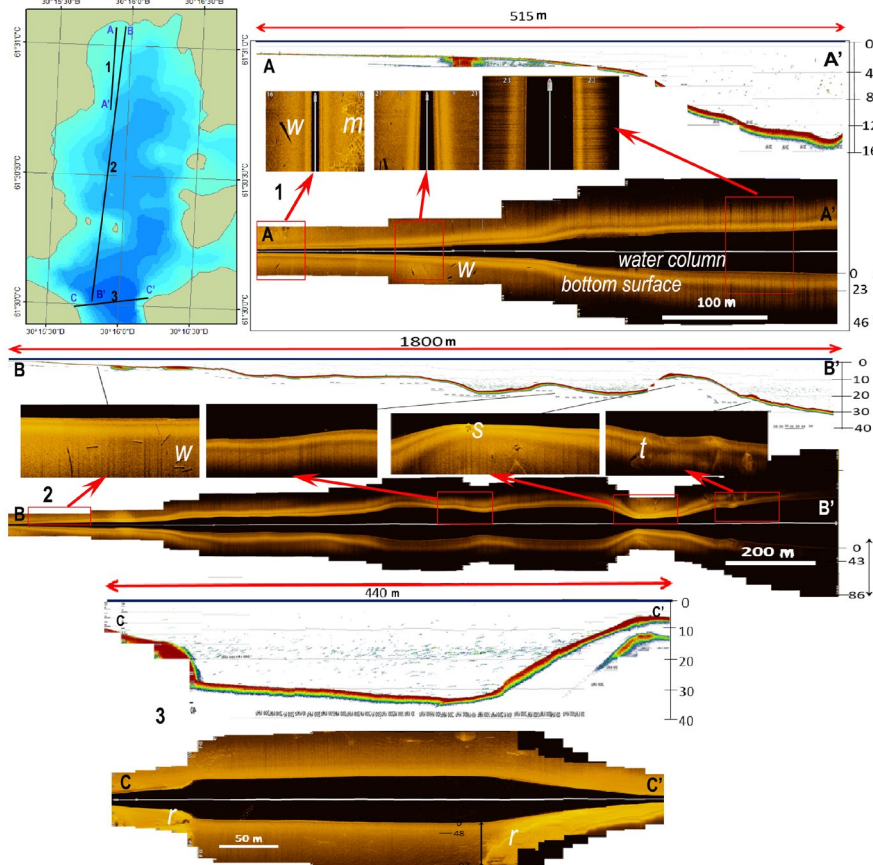


Fig.7. Zonation of the lakebed according to acoustic profiles: from the lower low-frequency beam (1) and from the mosaic of side-scan sonar (2).

Note: w – flooded wood, m – macrophyte thickets, s – isolated stone fragments, t – talus, r – underwater rock outcrops.

The lower part of the basin, with more gentle slopes that flatten out into a plain at depths of 20-30 meters below the 5-metre depth, composed of clayey silt with an aleurite admixture, exhibited a more homogeneous bottom surface and less mosaic variability in conditions. However, due to trout farming activities and differences in the input and accumulation of additional flows of increased organic matter (from settling feed and fish faeces), the substrate beneath the cages and in their immediate vicinity differed significantly from the substrate outside the cages. As a result, two distinct facies were identified: the untransformed substrate of the deep-water part of the bay (Facies 4)

and the anthropogenically transformed substrate with increased sediment accumulation and organic matter content (Facies 5). The biota at depths closer to 20–30 meters is mainly represented by oligochaetes, chironomids, amphipods, and mysids. Beneath the cages, in certain seasons, bacterial biofilm development has been observed, which hinders the formation of the benthic community. Notably, during periods of intense biofilm development, there was either a complete absence of benthic organisms or their presence was extremely sparse. Overall, for the facies of anthropogenically altered substrate, the biota has shown a simplification in community structure and a reduction in species



Fig.8. Typical appearance of an aleuropelitic bottom at depths below 5 metres: A - unaltered (1); B - with a thick layer of «organic» fluid mud (3) and bacterial film (2).

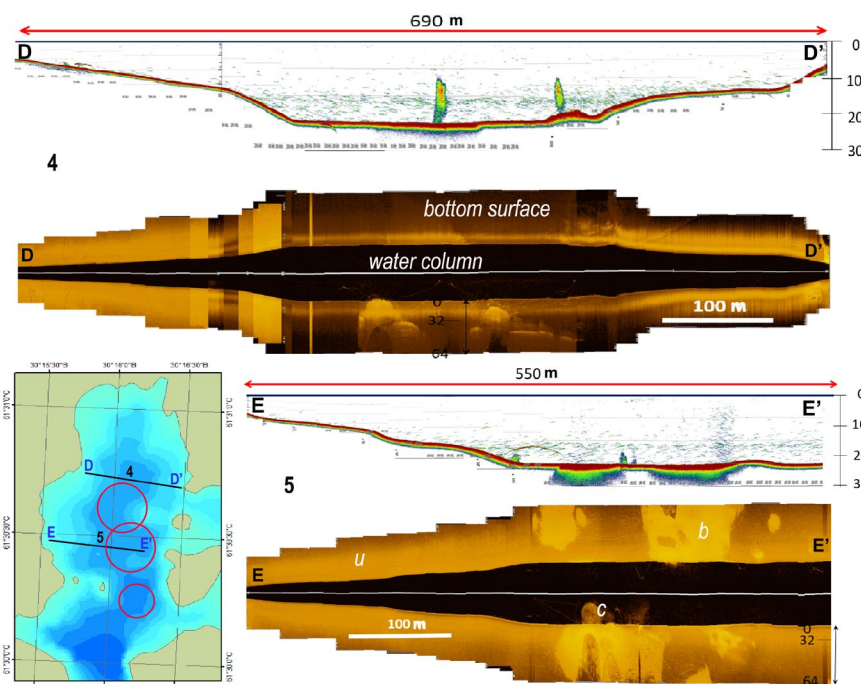


Fig.9. Acoustic profiles from areas near the cages (cage placement zones are marked with a red circle).
Note: u – undisturbed silts, b – silts with bacterial films, c – cage elements in the water column.

diversity. According to our data, the number of meiobenthos species beneath the cages (Facies 5) was more than three times lower compared to the bottom unaffected by the direct influence of the cages (5 and 17 species, respectively). For macrobenthos, the situation was even more critical: while 11 species of macrobenthos belonging to four taxonomic groups (Oligochaeta, Chironomidae, Crustacea, and Ceratopogonidae) were recorded on untransformed substrates at depths of 5–30 m (Facies 4), no macrobenthic organisms were found beneath the cages during the study period.

It is also worth noting a decline in the abundance and biomass of benthic organisms. For meiobenthos, these indicators decreased by 4.4 and 1.6 times, respectively, in the area near the cages compared to facies with undisturbed substrates. When compared with the shallow zone up to the 5-meter isobath, the changes were even more significant: abundance was 37.7 times lower, and biomass was 7.7 times lower.

It has also been noted that the concentration of natural ichthyofauna, according to acoustic survey data, increases specifically near the cages. During daylight hours in July 2024, the highest concentration of fish was observed in the layer at a depth of 12–20 meters. Overall, Facies 4 occupies the largest area—58%, while the anthropogenically altered substrate (Facies 5) covers about 9.5%. And it is likely that the localization and area of the latter may change depending on the position of the cages, their movement, and be related to the intensity of the load and the rate of organic matter dispersion when fresh pollution input ceases after the cages are relocated. The negative impact of pollutants from farming activities affects the entire aquatic ecosystem due to the presence of trophic links between its various components. Similar effects have been confirmed for marine ecosystems (Elvines et al., 2024). The negative impact of pollutants from farming activities affects the entire aquatic ecosystem due to the pres-

ence of trophic links between its various components. Similar effects have been confirmed for marine ecosystems (Elvines et al., 2024). It has been found that the impact on the benthos leads to the accumulation of organic nutrients from uneaten feed and fish waste on the bottom of the water body, where they decompose too slowly for biodegradation and transformation to occur within the ecosystem. This results in a toxic effect on the biota and its suppression. In cage farms located in areas with high water flow, waste accumulation is unlikely. Under such conditions, waste from farming activities disperses beyond the area adjacent to the farm, undergoes aerobic decomposition, and is assimilated by benthic organisms. Conversely, in low-flow areas, waste tends to accumulate (Brooks et al., 2003). The situation in the freshwater area we studied closely resembles the latter scenario.

In addition to the main facies, three other types of landscape units of the same level have been identified, occupying a small area but differing from other facies in terms of surface characteristics, sediment type, or the role of hydrodynamic impact. Acoustic surveying revealed two areas with distinct bottom characteristics (collectively covering no more than 1.8% of the bay's total area), where cages were presumably located in the past (Facies 6—transitional between Facies 4 and 5). This is reflected in the condition of the substrate surface, as evidenced by the increased thickness of the upper substrate layer in acoustic images, changes in the shape of surface objects, and color intensity on side-scan sonar images.

The complexity of the bay's relief has led to the presence of areas with narrow straits, where hydrodynamic activity is higher. In these areas, acoustic surveys have shown an increase in the roughness of the bottom surface, and video footage also indicated increased turbidity near the bottom. Consequently, the bottom of the strait in the southwestern part of Mustalakhti Bay

was classified as a separate landscape facies (Facies 7), occupying a small area (1.6%). At the base of the bedrock uplift in the western part of the bay, colluvium was identified. The increased spatial complexity due to debris of varying sizes and the infilling of spaces between them with soft sediments creates a complex that differs from other locations. This small area (0.1% of the total area) has also been classified as a separate facies (Facies 8).

In discussing the obtained data, it is important to note the following. Traditionally, various monitoring methods are employed to study the environmental impact of aquaculture facilities, which vary in cost and required expertise: (1) visual surveys by divers, (2) fauna analysis, (3) chemical analysis of bottom sediments, and (4) Sediment Profile Imagery (SPI). The results indicate that all methods are consistent in identifying the general «impact zone» beneath the cages and immediately adjacent to them. However, each method differed in its sensitivity to detecting more subtle impacts at greater distances from the cages (Carroll et al., 2003). In our case, an additional significant method from the landscape approach toolkit was the hydroacoustic survey of the bottom and its surface characteristics using «side» scanning. For spatial assessments, this method, in our view, shows great promise and accuracy. This hypothesis requires verification and further research.

4. Conclusion

The use of a landscape approach, with its range of studies, allowed us to comprehensively combine several methods and utilize remote sensing data, which overall represents a novel approach to studying the impact of fish farming on the condition of freshwater bodies — a method that has been scarcely used previously for freshwater environments.

The data obtained demonstrated that the application of a landscape approach, along with a full suite of modern remote methods, offers a new perspective on the issue of anthropogenic impact on the environment due to aquaculture activities. Research conducted in the impact zone of the trout farm revealed that the farm significantly contributes to changes in the composition of bottom landscapes. In the case of the studied area, the bottom area occupied by anthropogenically altered landscapes can cover a substantial portion of the water body where the cages are located. Considering the structural and material-energy interconnections, the potential transformative influence of this landscape element on the entire bay should be taken into account. This issue requires further investigation.

Acknowledgements

The authors express their sincere gratitude to M.I. Orlova, Director of the St. Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, and the SPbSC RAS for providing the equipment used in this study (side-scan sonar SOLIX 10), to S.N. Yudin, Chief Geologist of Kiviyarvi LLC, for compiling the geolog-

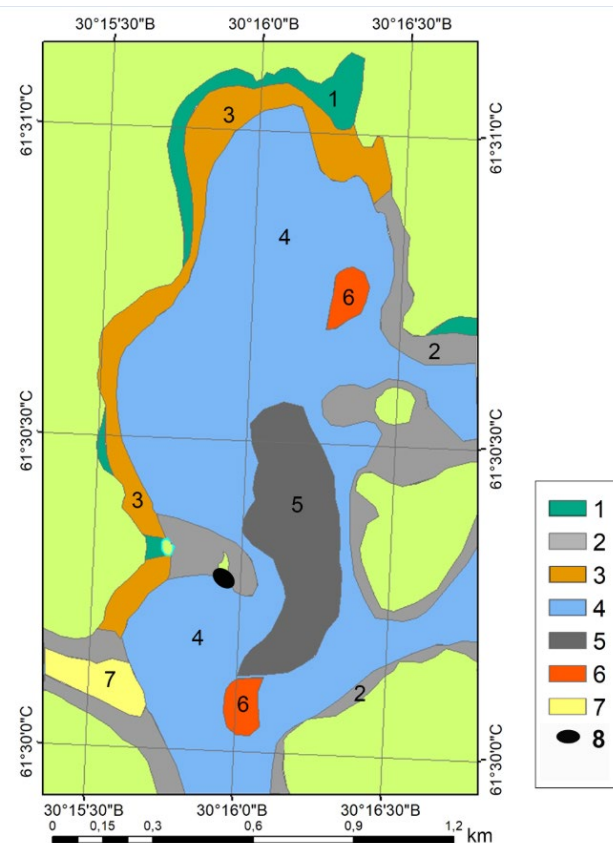


Fig.10. Landscape facies of Mustasaari Bay.

Note:

1. Macrophyte thickets - up to 3 m;
2. Rocky outcrops, exposed at minimum depths, covered by a thin layer of sediments at depths from 0 to 15 m;
3. Coastal areas down to depths of around 5 m with soft silts and frequently occurring tree trunks on the surface;
4. Undisturbed silts from 5 to 30 m;
5. Bottom in the area influenced by fish cages with sections covered by bacterial films; h from 20 to 27 m;
6. Bottom sections with altered surfaces due to factors of uncertain origin (possibly locations of old fish cages) with h at 19-20 and 32-33 m;
7. Disturbed bottom in the strait between the islands at 21-22 m;
8. Colluvium at the base of exposed rocky outcrops at 5-9 and 21-22 m.

ical map of the area, digitising and interpreting geological and geophysical data, and to M.O. Dudakov, Lead Engineer of the Hydrobiology Laboratory of the Institute of Limnology RAS (St. Petersburg Federal Research Center of the RAS), for invaluable assistance in conducting the fieldwork, including help with equipment preparation, sediment sampling, and bottom video recording.

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 research was funded by the Russian Science Foundation grant No. 23-24-00202, “Seasonal Dynamics of Geochemical Characteristics of Bottom Sediments and Biological Communities of Natural Water Bodies in the Zone of Influence of Cage Trout Farms”.

References

- Andrés J. 2011. Use of side scan sonar (SSS) in the management of fisheries and aquaculture: Examples of application in Andalusia, Spain. *Instrumentation Viewpoint* 11: 76.
- Brooks K.M., Stierns A.R., Mahnken C.V.W. et al. 2003. Chemical and biological remediation of the benthos near Atlantic salmon farms. *Aquaculture* 219(1): 355-377. DOI: [10.1016/S0044-8486\(02\)00528-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00528-8)
- Carroll M.L., Cochrane S., Fieler R. et al. 2003. Organic enrichment of sediments from salmon farming in Norway: environmental factors, management practices, and monitoring techniques. *Aquaculture* 226(1): 165-180. DOI: [10.1016/S0044-8486\(03\)00475-7](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00475-7)
- Che Hasan R., Ierodiconou D., Laurenson L. et al. 2014. Integrating multibeam backscatter angular response, mosaic and bathymetry data for benthic habitat mapping. *PLOS ONE* 9(5): e97339. DOI: [10.1371/journal.pone.0097339](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097339)
- Cochrane G.R., Lafferty K.D. 2002. Use of acoustic classification of side-scan sonar data for mapping benthic habitat in the Northern Channel Islands, California. *Continental Shelf Research* 22(5): 683-690. DOI: [10.1016/S0278-4343\(01\)00089-9](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00089-9)
- Dougall N., Black K. 2001. Determining sediment properties around a marine cage farm using acoustic ground discrimination: RoxAnnTM. *Aquaculture Research* 30(6): 451-458. DOI: [10.1046/j.1365-2109.1999.00351.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.1999.00351.x)
- Dudakova D.S., Anokhin V.M., Pozdnyakov Sh.R. et al. 2021. Underwater Landscapes of Mantsinsaari and Lunkulansaari Islands in the Zone of Riphean Uplifts in the Eastern Part of Lake Ladoga. *Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. Seriya Geograficheskaya [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series]* 85(3): 433-445. DOI: [10.31857/S2587556621030043](https://doi.org/10.31857/S2587556621030043) (In Russian)
- Dudakova D.S., Kapustina L.L., Mitrukova G.G. et al. 2024. The state of planktonic and benthic communities of the skerry region of Lake Ladoga near fish farms. *Trudy VNIRO* 196: 163-178. DOI: [10.36038/2307-3497-2024-196-163-178](https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-196-163-178) (In Russian)
- Elvines D.M., MacLeod C.K., Ross D.J. et al. 2024. Fate and effects of fish farm organic waste in marine systems: Advances in understanding using biochemical approaches with implications for environmental management. *Reviews in aquaculture* 16(36): 66-85. DOI: [10.1111/raq.12821](https://doi.org/10.1111/raq.12821)
- Farabi S.M.V., Golaghaei M., Sharifian M. et al. 2022. Effects of rainbow trout farming on water quality around the sea farms in the south of the Caspian Sea. *Caspian Journal of Environmental Sciences* 20(4): 729-737. DOI: [10.22124/CJES.2022.5725](https://doi.org/10.22124/CJES.2022.5725)
- Fish J.P., Carr H.A. 1990. *Sound underwater images. A guide to the generation and interpretation of side-scan sonar data.* Orleans: Lower Cape Publishing.
- Foster G., Walker B.K., Riegl B.M. 2009. Interpretation of Single-Beam Acoustic Backscatter Using Lidar-Derived Topographic Complexity and Benthic Habitat Classifications in a Coral Reef Environment. *Journal of Coastal Research* 53(6): 16-26. DOI: [10.2112/SI53-003.1](https://doi.org/10.2112/SI53-003.1)
- 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)
- Harris P.T., Baker E.K. 2012. Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat: GEOHAB Atlas of Seafloor Geomorphologic Features and Benthic Habitats – Synthesis and Lessons Learned. In: Harris P.T., Baker E.K. (Eds.), *GEOHAB Atlas of Seafloor Geomorphologic Features and Benthic Habitats*. 1st edition. Cambridge, pp. 871-890. DOI: [10.1016/B978-0-12-814960-7.00060-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814960-7.00060-9)
- Instructions for Organising and Conducting Geological Surveys of the Shelf at a Scale of 1:200,000 (GSS-200). 1995. St. Petersburg: VSEGEI. (in Russian)
- Kalantzi I., Karakassis I. 2006. Benthic impacts of fish farming: Meta-analysis of community and geochemical data. *Marine pollution bulletin* 52(5): 484-493. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2005.09.034](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.09.034)
- Kristmundsson J., Patursson O., Potter J. et al. 2023. Fish Monitoring in Aquaculture Using Multibeam Echosounders and Machine Learning. *IEEE Access* 99: 1-1. DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3320949](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3320949)
- 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(1): 654-660. DOI: [10.1016/j.aaf.2022.09.003](https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.09.003)
- Methodological Recommendations for the Collection and Processing of Materials in Hydrobiological StudiZoobenthos and es. Its Production. 1983. In: Vinberg G.G., Lavrentyeva G.M. (Ed.). Leningrad: GosNIORKh (State Research Institute of Lake and River Fisheries). (In Russian)
- Milyanchuk N.P., Ilmast N.V., Sterligova O.P. et al. 2019. The fish population of Lake Syamozero near a trout farm. *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk [Proceedings of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences]* 11: 42–49. (In Russian)
- Quintino V. 2003. Benthic biotopes remote sensing using acoustics. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 285-286(4): 339-353. DOI: [10.1016/S0022-0981\(02\)00536-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(02)00536-1)
- Ridgway J.L., Madsen J.A., Fischer J.R. et al. 2024. Side-scan sonar as a tool for measuring fish populations: current state of the science and future directions. *Fisheries* 49(10): 449-500. DOI: [10.1002/fsh.11137](https://doi.org/10.1002/fsh.11137)
- Rooney R.C., Podemski C.L. 2009. Effects of an experimental rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) farm on invertebrate community composition. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 66(11): 1949-1964. DOI: [10.1139/F09-130](https://doi.org/10.1139/F09-130)
- Ryzhkov L.P., Dzyubuk I.M., Gorokhov A.V. et al. 2011. The state of the aquatic environment and biota during operation of trout-breeding pond farms. *Water Resources* 38(2): 244-252. DOI: [10.1134/S0097807811020138](https://doi.org/10.1134/S0097807811020138)
- Semenovich N.I. 1966. *Bottom sediments of Lake Ladoga.* Moscow; Leningrad: Nauka. (In Russian)
- State geological map of the Russian Federation scale 1:1 000 000 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)
- Subetto D.A., Ignatyeva N.V., Davydova N.N. et al. 2002. Bottom sediments and their role in assessing the evolution of Lake Ladoga. In: Rumyantsev V.A., Drabkova V.G. (Eds.), *Lake Ladoga: Past, Present, and Future*. St. Petersburg, pp. 122–164. (In Russian)
- Villnäs A., Perus J., Bonsdorff E. 2011. Structural and functional shifts in zoobenthos induced by organic enrichment — Implications for community recovery potential. *Journal of Sea Research* 65(1): 8-18. DOI: [10.1016/j.seares.2010.06.004](https://doi.org/10.1016/j.seares.2010.06.004)
- Zaripova K.M., Lapenkov A.E., Guzeva A.V. 2024. Spatio-Temporal Dynamics of Biogenic Element Accumulation

in Bottom Sediments in the Impact Zone of Trout Farming (Lake Ladoga) *Water Resour* 51: 836–843. DOI: [10.1134/S0097807824701094](https://doi.org/10.1134/S0097807824701094)

Zuikova Yu.L., Shilova T.M. 2000. Geologic report, TED, TEO, TES. 27064. Compilation of consolidated aero-geophysical maps for the Ladoga-Onega area on a scale of 1:200,000 in 1995–2000. St. Petersburg: GP PGE. (In Russian)

Изменение облика подводных ландшафтов прибрежной зоны крупного пресноводного водоема под влиянием деятельности форелевого хозяйства на примере зал. Мусталахти Ладожского озера

Дудакова Д.С., Лапенков А.Е., Анохин В.М., Гузева А.В., Зарипова К.М.

Институт озероведения 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. В заливе Мусталахти Ладожского озера, используемом для размещения форелевых садков, проведено исследование структуры донных ландшафтов и трансформации поверхности дна под влиянием рыбоводного хозяйства. В целях получения полевого материала для картирования донных ландшафтов проводились гидроакустические исследования с гидролокатора бокового обзора (ГЛБО) SOLIX 10 SI MEGA CHIRP и фотовидеосъемка с подводного аппарата Limnoscout. Также осуществлялись стандартные седиментологические и биологические исследования дна. Выделение отдельных фациальных элементов проводилось с использованием морфометрических признаков (зоны глубинной дифференциации, уклоны дна в разных частях залива и элементы рельефа), сведений о характере донных отложений (тип донного осадка, состав наилка), по характерному облику поверхности дна и по донным биологическим сообществам (доминирующие группы бентоса, наличие/отсутствие макрофитов). В результате проведенных работ были получены батиметрическая и ландшафтная карты исследуемого залива, выделены характерные особенности отдельных ландшафтных фаций. Всего выделено 8 фаций. Было показано значительное негативное влияние форелевых садков на дно залива. Это подтверждается: 1. значительными изменениями во внешнем облике дна, обнаруживаемые по данным видеосъемки; 2. визуальными изменениями поверхности на акустических изображениях (сонограммах) с ГЛБО; 3. увеличением мощности донных осадков и повышенным накоплением органического вещества, доказанных съемками с эхолота и ранее проведенными нашей группой исследованиями химического состава грунтов в зоне садков. Согласно полученным данным, особенности котловины исследуемого залива, в частности, достаточно крутые борта и значительная площадь пологого участка с относительно большими глубинами (20-35 м), приводят к возникновению условий накопления антропогенно трансформированного осадка на участке, соответствующем площади подсадкового пространства, и на удалении от него на первые десятки метров (зона до 100 м в диаметре вокруг каждого садка). **Заключение:** Использование ландшафтного подхода с использованием современных инструментов исследований, в частности акустической и подводной фотовидеосъемки, позволило дать пространственную оценку влияния форелевого хозяйства на состояние исследуемой части пресноводного водоема.

Ключевые слова: донные ландшафты, Ладожское озеро, садковые хозяйства, картирование, гидролокатор бокового обзора (ГЛБО), телеуправляемый необитаемый подводный аппарат ТНПА Limnoscout

Для цитирования: Дудакова Д.С., Лапенков А.Е., Анохин В.М., Гузева А.В., Зарипова К.М. Изменение облика подводных ландшафтов прибрежной зоны крупного пресноводного водоема под влиянием деятельности форелевого хозяйства на примере зал. Мусталахти Ладожского озера // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 6. - С. 1503-1524. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1503

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: judina-d@yandex.ru (Д.С. Дудакова)

Поступила: 18 сентября 2024; **Принята:** 02 декабря 2024;

Опубликована online: 25 декабря 2024

© Автор(ы) 2024. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



1. Введение

В настоящее время одной из существенных проблем, связанных с негативными изменениями состояния окружающей среды, в частности, со стороны объектов аквакультуры, является загрязнение пресноводных водоемов органическим веществом и микроэлементами, что может вызывать изменение уровня трофии водоемов, отрицательно влиять на биологические сообщества, инициировать перестройки экосистем (Рыжков и др., 2011; Милянчук и др., 2019; Larenkov et al., 2023; Дудакова и др., 2024; Guzeva et al., 2024; Zaripova et al., 2024). Изученность данного вопроса гораздо выше для морских объектов аквакультуры (Kalantzi and Karakassis, 2006; Rooney and Podemski, 2009; Villnäs et al., 2011; Farabi et al., 2022; Elvines et al., 2024).

Применяемые методы изучения подобного влияния, как правило, опираются на стандартные методы гидрохимических, гидробиологических, седиментологических исследований (Carroll et al., 2003; Larenkov et al., 2023). Однако в настоящее время для целей картирования донных биотопов, количественной оценки запасов биологических ресурсов и изучения донных ландшафтов, а также выявления антропогенной трансформации дна водных объектов и пространственной оценки происходящих изменений, широко используются методы дистанционного зондирования, дополняющие традиционные (Fish and Carr, 1990; Quintino, 2003; Foster et al., 2009; Cochrane and Lafferty, 2002; Harris and Baker, 2012; Che Hasan et al., 2014). Среди последних одним из наиболее эффективных методов является гидроакустический, основанный на использовании классических однолучевых, а также многолучевых эхолотов и гидролокаторов бокового обзора (ГЛБО). В целом, использование многолучевых эхолотов и ГЛБО в области изучения объектов аквакультуры больше нацелено на наблюдение за рыбой в садках и оценку ее запасов (Kristmundsson et al., 2023; Ridgway et al., 2024). Вопрос его применения для оценки изменения состояния дна под

садками разработан недостаточно (Dougall and Black, 2001; Andrés, 2011).

Цель работы: оценка влияния объектов садковой аквакультуры на состояние подводных ландшафтов в крупном пресноводном водоеме с использованием современных методов дистанционного зондирования.

2. Материалы и методы

2.1. Район исследования

Исследования проводились в заливе Мусталахти (в шхерах Якимварского залива) Ладожского озера недалеко от г. Лахденпохья (Рис. 1). Площадь залива составляет порядка 2.2 км², он вытянут в субмеридиональном направлении, общая протяженность составляет 2.4 км.

В данном заливе расположены объекты садкового форелевого хозяйства ООО «Акуловка». Согласно спутниковым снимкам, первые садки в бухте появились в 2011 г. В среднем изучаемое хозяйство производит 1000 тонн рыбы в год. Особенностью функционирования форелевых хозяйств является сезонное изменение интенсивности режима кормления, связанное с температурой воды. Зимой при низких температурах объем вносимого корма минимален, с наступлением весны и в течение лета увеличивается, к концу осени постепенно снижается. В августе во время самого активного сезона кормления общее поступление корма в садки составляет 6 – 10 тонн в сутки (Дудакова и др., 2024).

Даты проведения исследований: 01.03.2023, 06.07.2023 и 24-25.07.2024.

2.2. Методы исследования

Ландшафтные исследования дна акватории залива были основаны на эхолотировании, использовании подводной видеосъемки и акустического сканирования дна с применением гидролокатора

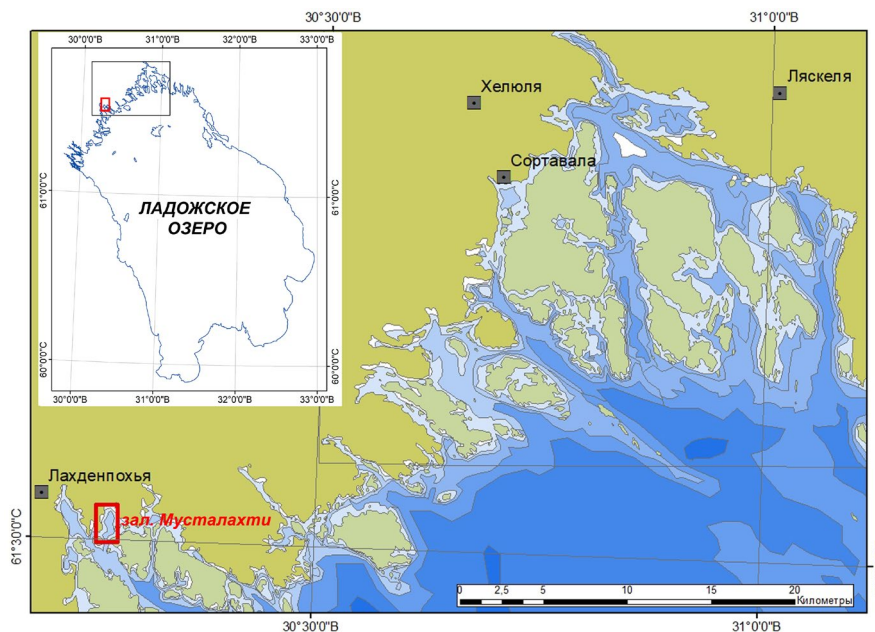


Рис.1. Расположение района проведения исследований (зал. Мусталахти) в Ладожском озере.

бокового обзора (ГЛБО), а также донном пробоотбора для изучения донных отложений и биоты данного участка акватории.

Для целей выявления структуры подводного рельефа проводилось эхолотирование. Использован эхолот Hummingbird SOLIX 10 SI MEGA CHIRP. При прохождении серии галсов производилась цифровая запись глубин. Создание цифровой батиметрической модели по полученным цифровым данным проводилось с использованием программ Surfer 9 и Arc Map 10.5. Точки замеров глубин с координатной привязкой в системе WGS-84 снимались в таблицы Excel с показаний эхолота. Для извлечения координат нулевых глубин при построении батиметрической карты отрисовывались контуры береговой линии в Google Earth Pro, конвертировались через файл-KMZ в shp-файл и в ArcMAP извлекались в таблицы Excel координаты точек. Для более четкой картины при построении карт добавлены точки на суше с положительными гипсометрическими отметками. Суммарная выборка подвергалась анализу с целью выявления и отбраковки точек замеров эхолота, не согласующихся с общими закономерностями распределения, это единичные точки, которые, по-видимому, связаны с аномальными условиями работы прибора. Цифровая модель рельефа создавалась в виде растра, применялся метод Natural neighbor. На основе цифровой растровой модели рельефа с помощью инструментов ГИС получены различные морфометрические схемы: угол наклона (Slope), направление (азимут) максимального уклона (Aspect), построены разрезы по профилям дна. Для более наглядной картины схемы создавались в прямоугольной системе координат Пулково, 1942, зона 6, для чего градусные географические координаты точек (x,y WGS-84) пересчитывались в метровые координаты. Трехмерные модели рельефа строились в программе Surfer 9.

Для подводной видеосъемки применялся телеуправляемый необитаемый подводный аппарат Limnoscout, разработанный для условий Ладожского озера (Дудакова и др., 2021). Его применение в исследованиях подводных ландшафтов Ладожского озера основано на проведении видеопрофилирования на участках дна длиной до 1 км с параллельной привязкой к глубинам и проходному треку. Осуществлялось пассивное протягивание подводного аппарата близко к поверхности дна (10-20 см) с использованием физического эффекта парения. Получаемые изображения имели ширину захвата изображения дна в кадрах порядка 50-100 см. Видеосъемка на участках, где расположены компоненты садковых установок, затруднена в связи с большим числом растяжек, тросов и якорных элементов (бетонные блоки) для фиксации садков. Соответственно, подход, используемый при обычных условиях видеопрофилирования при прямых проходах профилей, был модифицирован на видеосъемку на отдельных коротких отрезках на разных частях залива. В зоне садков съемка проводилась непосредственно с них прохождением камеры над дном с управлением с проходных площадок на садках.

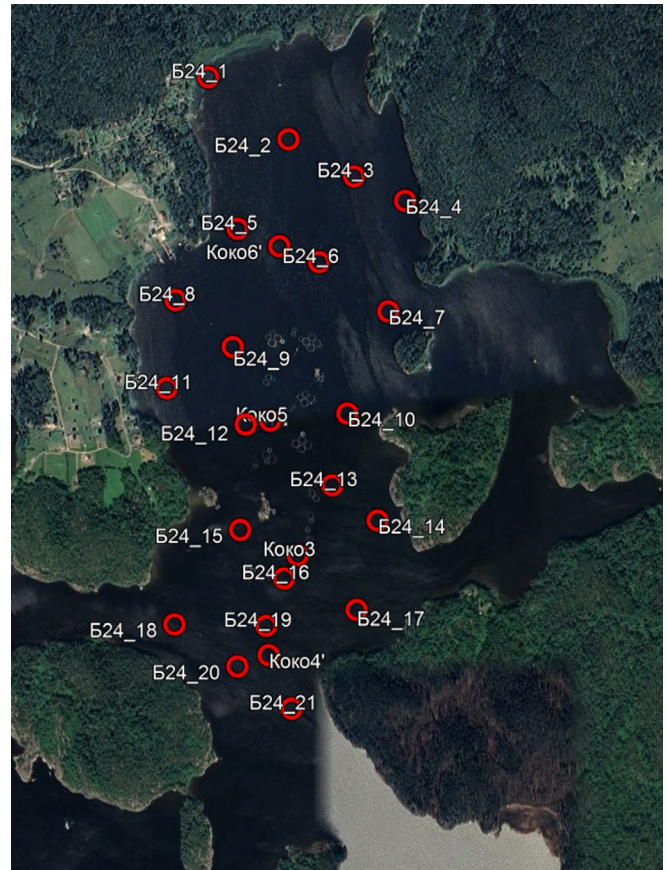


Рис.2. Расположение станций отбора проб.

Для площадных съемок дна применялось акустическое сканирование с использованием гидролокатора бокового обзора (Hummingbird SOLIX 10 SI MEGA CHIRP). По данным акустических съемок получены серии сонограмм, на которых отображается изображение типов дна и отдельных объектов на нем. Анализ параллельных полос мозаик сонограмм (акустических профилей) позволяет выделять элементы на разных типах дна с пространственной привязкой и дает возможность проводить границы между отдельными ландшафтными единицами. Сонограммы для построения мозаик получены в режиме с отображением толщи воды, соответственно, это позволяло производить синхронную оценку изменения характера дна со сменой глубин. Использовались также данные об изменении мощности поверхностного слоя донного осадка, получаемые с помощью гидроакустической съемки с нижнего луча эхолота на низкочастотном режиме (455 мГц).

Основными критериями выделения фациальных границ в масштабах исследуемого залива были геоморфологический и седиментационный. Геоморфологические признаки анализировались на основании данных с полученной при батиметрической съемке цифровой модели рельефа дна. Рассчитывались параметры: уклон дна, экспозиция. Тип мягких донных осадков определялся при отборе их с использованием дночерпателя ДАК250. В период 2023-2024 гг. было исследовано 25 станций (Рис. 2). Проводилось визуальное обследование, описание и оценка мощности разных слоев донных осадков, а также типирование их по соот-

ношению фракций разной крупности при визуальной и органолептической оценке (Инструкция по..., 1995). Особое внимание уделялось мощности органического слоя, наблюдаемого в зоне воздействия садков. Данные по биологической части донных ландшафтов основаны на оценке состояния макрозообентоса по данным донного пробоотбора, проведенного 24.07.2024 (Рис. 2: станции с Б24_1 по Б24_21), а также сезонного пробоотбора, проведенного на четырех станциях в 2023 г. (Рис.2: Станции Коко 3, 4', 5 и 6'). При сборе и обработке бентоса применялись стандартные принятые в гидробиологии методы (Методические рекомендации..., 1983). Отбор проб донных отложений на исследование зообентоса проводился с помощью коробчатого дночерпателя ДАК-250 (модификация Экмана-Берджи площадью захвата 1/40 м²). Для оценки роли отдельных таксонов в донных ландшафтах оценивалась структура сообщества и состав доминантного комплекса. Акустические данные по встречаемости и числу акустических сигналов от рыбы, полученные эхолотом, использовались для оценки распределения ихтиофауны в период проведения исследования. Поскольку активность и плотность ихтиофауны оказывает влияние на характер поверхности дна, эти характеристики также учитывались при оценке состояния донных ландшафтов по биологическим критериям.

При анализе комплекса признаков выделялись отдельные фации в структуре ландшафтов изучаемой части акватории, и, как итог, создана цифровая модель донных ландшафтов залива. С помощью этой модели проведена оценка площадей, занятых под различными фациями, рассчитана доля антропогенно измененной акватории.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Особенности котловины залива

По построенной цифровой модели рельефа рассчитаны характеристики залива Мусталахти. Средняя глубина его составляет 12.9 м, максимальная – 36 м. Как можно видеть из полученной батиметрической карты, максимальные глубины смещены к южной открытой части залива (Рис. 3: А). И, несмотря на то, что в целом залив имеет субширотное простираие, имеется ряд осложняющих особенностей рельефа, выраженных в наличии поднятий в перпендикулярном направлении. Это связано с особенностями геологии участка (Рис. 4). В геологическом отношении участок сложен образованиями ихольской и кухминской толщ лахденпохского метаморфического комплекса (Госгеолкарта, 2015). В западной части залива залегает ихальская толща графит-биотовых гнейсов и диопсидовых скарнов, участок ее развития выделяется положительной аномалией Та по данным магниторазведки (Зуйкова и Шилова, 2000), что связано с вкрапленностью пирротина и магнетита. Магнитная восприимчивость пород, входящих в ихальскую толщу заметно выше, чем у пород кухминской толщ. На востоке залива в составе кухминской толщи преобладают мигматизированные гранат-биотитовые гнейсы, контакты метаморфических пород разных толщ тектонизированы. Углеродсодержащие гнейсы обнаруживают медно-полиметаллическую специализацию, что, наряду с фактором загрязнения от объектов рыбоводческих садков, возможно, объясняет наличие аномалий меди, цинка в донных отложениях залива, выявленных при обследовании донных отложений в районе форелевого хозяйства

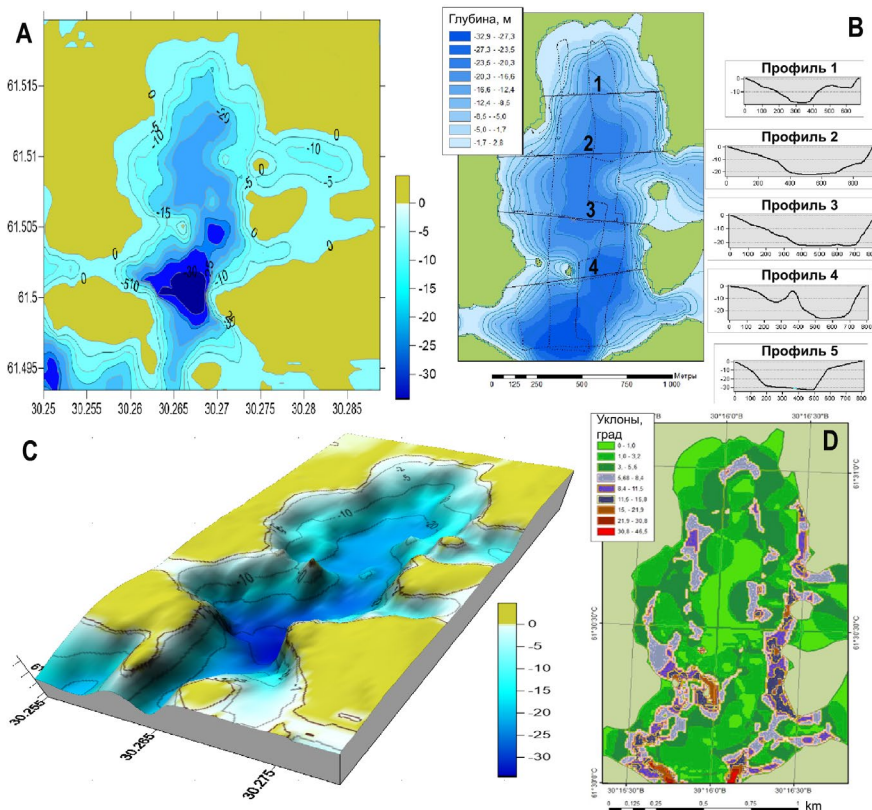


Рис.3. Батиметрическая карта залива Мусталахти, по данным эхолотных промеров: А – двухмерная батиметрическая карта; В – поперечные профили рельефа дна; С- трехмерная модель рельефа дна; D – карта уклонов дна.

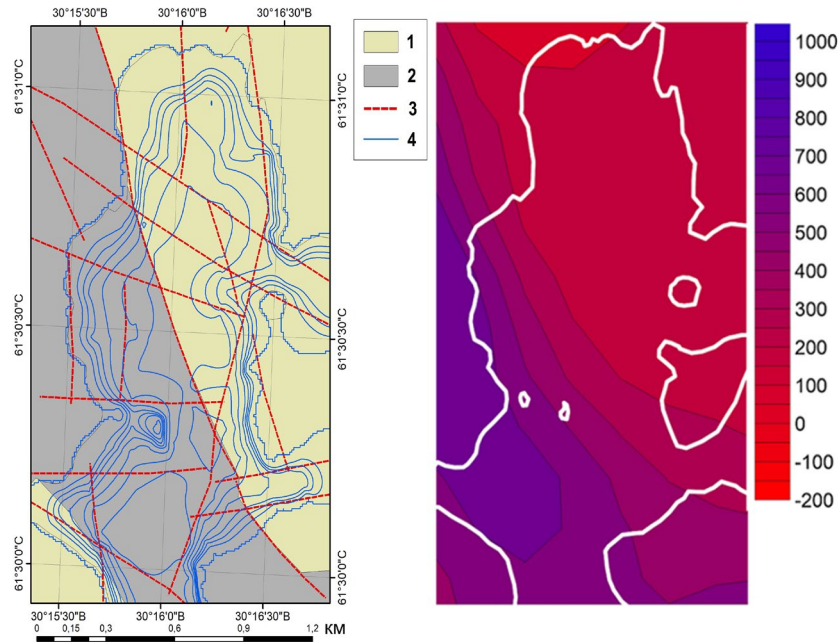


Рис.4. Геологическая схема участка и карта аномального магнитного поля (нТл) (оцифровано по данным: Зуйкова и Шилова, 2000; Госгеолкарта, 2015)

Примечание: 1. – Кухкинская толща – мигмаизированные гранат-биотитовые гнейсы; 2 – Ихальская толща – графит-биотитовые гнейсы; 3. – Разломы; 4. – Изобаты.

бухты Мусталахти (Guzeva et al., 2024). Разрывные нарушения определяют мелкую блокировку разных частей залива и подчеркиваются крутыми склонами субмеридиональной и северо-восточной ориентировки (Рис. 4). В целом залив имеет корытообразную котловину с крутыми уклонами по бортам и достаточно выровненным плоским дном по центру (Рис. 3: Б). Западный борт более пологий по сравнению с восточным (Рис. 3: В). Важным элементом является поднятие дна субмеридионального направления в южной части. Это определяет затруднение водообмена с южнее расположенной частью акватории и влияет на распределение донных осадков. Восточный и западный борта котловины залива имеют значительные подъемы дна, препятствующие перемешиванию воды в бухте и перемещению донных осадков. Подводные поднятия препятствуют обмену осадочным материалом между отдельными котловинами, которые таким образом представляют своеобразные конечные седиментационные бассейны для локальных источников загрязнения.

3.2. Донные отложения и подводные ландшафты залива Мусталахти

В заливе Мусталахти выявлено пять разновидностей естественных рыхлых донных отложений: песок мелкозернистый, ил алевритовый, ил глинистый, ил глинистый с примесью алеврита, а также еще один тип, образующийся в результате антропогенной активности – усиленного попадания органического вещества: ил глинистый с примесью алеврита, с мощным слоем наилка, загрязненного органическим веществом (Рис. 5). Коренные породы слагают борта котловины и островные поднятия и проявляются до глубин 15-20 м. Основная площадь дна залива сложена глинистыми илами с примесью

алеврита (алевропелитами), как естественными, так и с увеличенным слоем осадка с высоким содержанием органического вещества.

Большая часть дна в заливе (как и во всем Ладожском озере) покрыта так называемым наилком – поверхностным слоем сильно обводненного осадка текучей консистенции мощностью 2-4 см. Обычно этот наилкок представлен алевритовым осадком с существенной примесью песчаных частиц. Примесь алеврита составляет 10-30%. Обычно содержит до 5 % мелкозернистого песка. Слой наилка находится в зоне аэрации и является зоной наиболее активной жизнедеятельности биоты. В принципе слой наилка можно сопоставить с почвенным слоем суши. В шхерной части Ладожского озера возраст наилка не превышает 10 лет, так как скорость осадконакопления варьирует от 1 до 2 мм в год (Семенович, 1966; Субетто и др., 2002). Под садками рыбного хозяйства и на некотором удалении от них наблюдаются аномально большие мощности наилка (до 18 см), зачастую насыщенного органическим веществом. Под слоем наилка на большей площади залива распространены глинистые илы с примесью алеврита. Обычно это осадок серого цвета с желтым оттенком, мягкий, вязкий, с некоторым уплотнением книзу, часто – с темными примазками органического вещества.

Песчаное дно не характерно для исследуемого участка акватории. В пробах с глубин до 3 м песок мелкозернистый выявлен только на двух станциях в юго-западной и юго-восточной части (Рис.4: Ст. Б24_15 и Б24_17). Данные акустической съемки подтвердили отсутствие обширных участков, сложенных песчаным грунтом. Также практически отсутствовал коллювий в основании скальных обнажений. Перекрытие неразрушенных скальных уступов рыхлыми осадками является характерной чертой всех прибрежных участков вдоль береговой

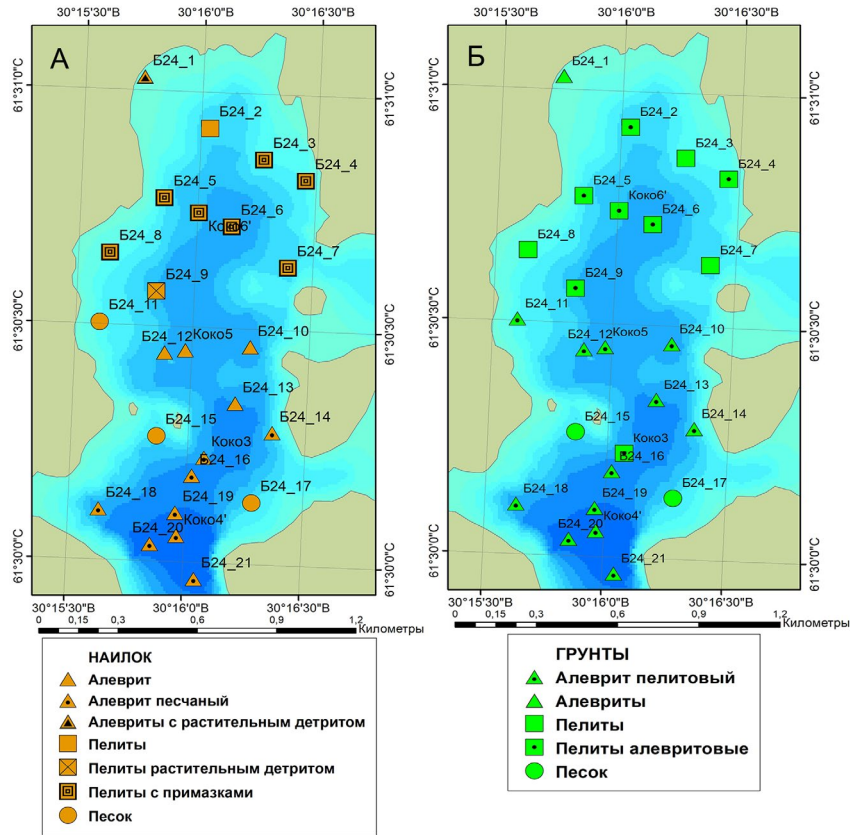


Рис.5. Распределение типов донных осадков по составу наилка (А) и основного осадка под наилком (Б) по акватории залива Мусталахти на исследованных станциях.

линии (Рис. 6). Коллювий отмечен лишь в районе юго-западного поднятия у подножия двух мелких островов.

Акустическая съемка (Рис.7) показала, что на участках с нетрансформированным донным осадком, сложенных в основном глинистыми илами с примесью алеврита, по глубине и наличию на поверхности древесного опада выделялись две зоны: одна - до глубины 5 м с повсеместно отме-

чаемыми затонувшими стволами деревьев (дополнительные элементы биотопов, увеличивающие пространственную сложность и биологическое разнообразие), вторая – ниже этих глубин с выровненным и «пустым» дном (Рис.8А).

Отдельной разновидностью поверхности дна выделялась поверхность с увеличенным слоем органического вещества. На низкочастотных акустических профилях отмечается увеличение мощ-

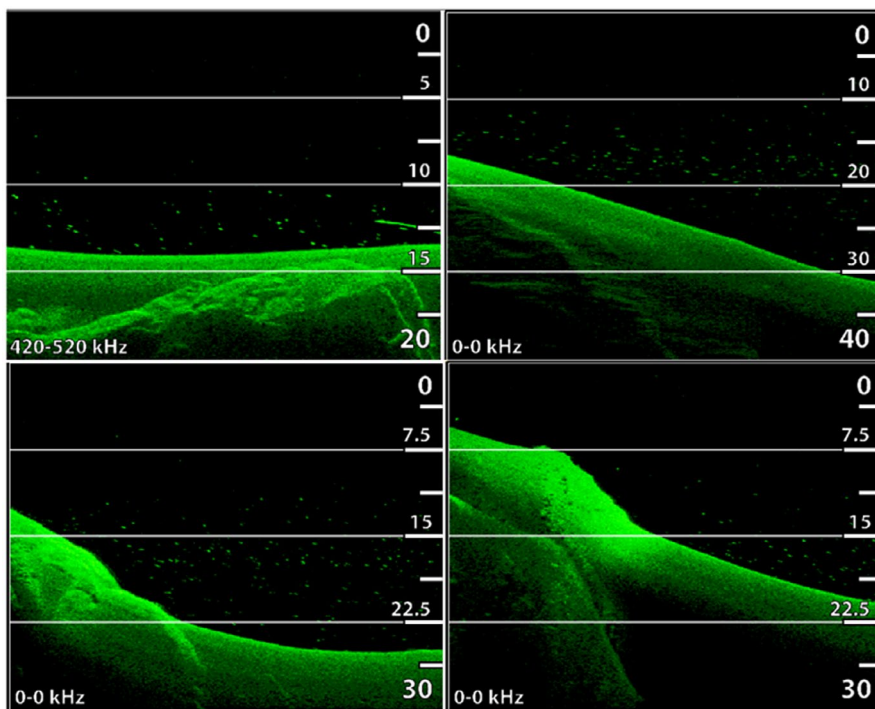


Рис.6. Граница коренных пород и рыхлых отложений по акустическим изображениям с высокочастотного нижнего луча эхолота с функцией ГЛБО.

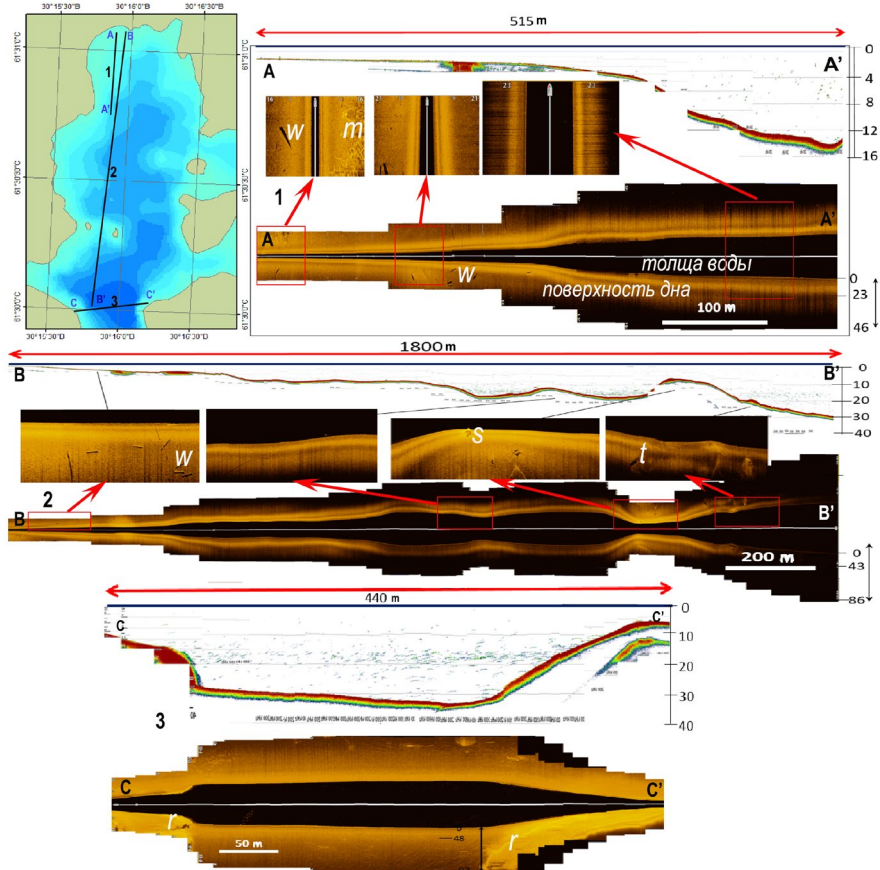


Рис.7. Зональность дна по акустическим профилям: с нижнего низкочастотного луча (1) и по мозаике с гидролокатора бокового обзора (2)

Примечание: w – затопленные деревья (flooded wood), m – заросли макрофитов (macrophytes), s – отдельные каменистые обломки (stones), t – осыпи (talus), r – подводные скальные обнажения (rocks).

ности мягкого грунта за счет повышенного накопления наилка, о чем было сказано выше. Ядрами таких «пятен» было пространство под садками. Акустическая съемка позволила оценить масштаб распределения такого типа грунтов. На сонограммах изображение имело более светлый тон (Рис. 9). Диаметр охвата дна для таких пятен составлял до 100 м от центра садка.

Комплекс проанализированных данных позволил построить ландшафтную карту (Рис. 10). Выделено восемь ландшафтных фаций в пределах исследуемого залива.

Заращение мелководий бухты макрофитами (Фация 1) выражено очень незначительно и отмечено в относительно значимом масштабе лишь в кутовой южной части бухты. Для зарослевых биотопов характерно более интенсивное развитие донной биоты и повышение видового разнообразия по сравнению с незаросшими участками акватории. В целом под данной фацией находится не более 4,5% площади дна залива.

Борта котловины, имеющие наиболее крутые уклоны (в основном в восточной части залива), представляют отдельный элемент ландшафтов изу-



Рис.8. Характерный облик алевропелитового дна на глубинах ниже 5 м: А – нетрансформированный (1); Б – с высокой мощностью «органического» наилка (3) и бактериальной пленкой (2).

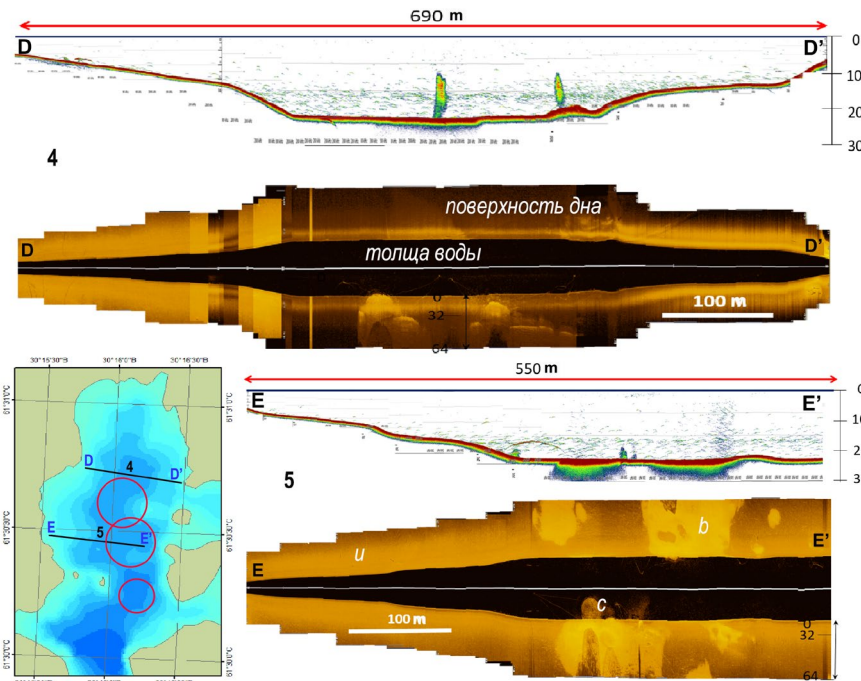


Рис.9. Акустические профили с участков в районе садков (зоны размещения садков показаны красным кругом)

Примечание: u – ненарушенные илы (undisturbed silts), b – илы с бактериальной пленкой (bacterial films), c – элементы садков в толще воды (cages).

чаемого участка акватории (Фация 2). Сложены коренными породами с небольшими перекрытиями мягкими осадками в понижениях. Для данной фации помимо эвритопных групп бентоса, встречающихся на мелководье (олигохеты, хирономиды, водные клещи, изоподы и амфиподы), характерно наличие зооперифитонных групп донных беспозвоночных, в частности губок и мшанок, ассоциированных с твердым субстратом; присутствие гастропод. Расчетная доля Фации 2 – 15% общей площади.

Для мелководья до 5 м глубины в западной более пологой части залива (Фация 3) выявлено дно, сложенное разнотипными грунтами (пески, ил алевритовый, ил глинистый, ил глинистый с примесью алеврита), что увеличивает мозаичность биотопов, формирующихся в пределах данной фации. Пространственная сложность поверхности дна увеличена за счет древесных стволов, затопленных на этих глубинах. Развитие донной биоты характеризуется относительно высокими количественными показателями. В состав доминирующих таксонов входят группы, приуроченные к литоральной зоне (крупные двустворчатые моллюски, ручейники), а также эвритопные таксоны (олигохеты, личинки хирономид). Доля фации 3 составляет порядка 10% от общей площади залива.

Пониженная часть котловины с более пологими уклонами и выполаживающаяся в равнину на глубинах 20-30 м ниже глубин 5 м, сложенная илом глинистым с примесью алеврита, имела более однородное состояние донной поверхности, меньшую мозаичность условий. Однако в связи с деятельностью форелевого хозяйства и различиях в поступлении и накоплении дополнительных потоков повышенного органического вещества (с оседающими кормами и фекалиями рыб) дно под садками и в непосредственной близости от них по сравнению

с дном вне садков имело значительные различия. В итоге было выделено две отдельные фации – нетрансформированного дна глубоководной части залива (Фация 4) и дно, трансформированное антропогенно, с увеличенным осадконакоплением и содержанием органического вещества (Фация 5). Биота на глубинах ближе к 20-30 м представлена, главным образом, олигохетами, хирономидами, амфиподами, мизидами. Под садками в некоторые сезоны года отмечается развитие бактериальной пленки, что служит препятствием для формирования бентосного сообщества. Характерно, что при интенсивном ее развитии отмечалось отсутствие бентосных организмов или их чрезвычайно скудное присутствие. В целом для фации антропогенно измененного дна для биоты отмечено упрощение структуры сообщества и сокращение видовой разнообразия. Так, согласно полученным нами данным, число видов мейзообентоса под садками (Фация V) было более чем в 3 раза меньше по сравнению с дном, незатронутым прямым влиянием садков (17 и 5 видов, соответственно). Для макрозообентоса ситуация была еще более критичной: если на нетрансформированных грунтах на глубинах 5-30 м (Фация IV) встречено 11 видов макрозообентоса из четырех таксономических групп (Oligochaeta, Chironomidae, Crustacea и Ceratopogonidae), то под садками в период проведения исследования организмы макрозообентоса отсутствовали.

Также следует отметить, что происходило снижение численности и биомассы бентосных организмов. Так, для мейобентоса отмечено соответствующее снижение этих показателей в 4,4 и в 1,6 раза в районе садков по сравнению с фацией ненарушенных грунтов. А если проводить сравнение с мелководной зоной до 5 метровой изобаты, то эти изменения были еще более существенными: чис-

ленность была ниже в 37,7, биомасса – в 7,7 раза. При этом отмечено, что концентрация представителей естественной ихтиофауны, согласно данным акустической съемки, в заливе повышается именно вблизи садков. В дневное время в июле 2024 г. наибольшее концентрирование рыбы было приурочено к слою на 12-20 м глубине. В целом Фация 4 занимает наибольшую часть площади – 58%, антропогенно измененное дно (Фация 5) – порядка 9,5%. И, вероятно, локализация и площадь последней может изменяться в зависимости от расположения садков, их перемещения, и быть связанной с интенсивностью нагрузки и скоростью рассеивания органического вещества при исчезновении поступления свежего загрязнения при переносе садков в другое место. Отрицательное влияние загрязнителей от фермерских хозяйств сказывается на всей экосистеме водоема в связи с наличием трофических связей между отдельными ее компонентами. Подобные эффекты подтверждены для морских экосистем (Elvines et al., 2024). Для них было выявлено, что воздействие на бентос приводит к тому, что органические питательные вещества, содержащиеся в несъеденных кормах и рыбных отходах, скапливаются на дне водоема и разлагаются недостаточно быстро, чтобы происходило их биоразложение и трансформация внутри экосистемы. Это приводит к появлению токсического эффекта для биоты и ее угнетению. На фермах, расположенных над дном в районах с высокой проточностью, накопление отходов маловероятно. В таких условиях попадающие в водоем отходы деятельности хозяйства рассеиваются за пределами территории, прилегающей к ферме, подвергаются аэробному разложению и усваиваются донными организмами. И, наоборот, в местах слабопроточных, как правило, отходы скапливаются (Brooks et al., 2003). Ситуация на исследованном нами участке пресноводного водоема близка ко второму варианту.

Помимо основных фаций выделено еще три разновидности ландшафтных единиц того же уровня, занимающие незначительную площадь, однако отличающиеся от других фаций по характеру поверхности, типу осадка или роли гидродинамического воздействия. Акустическая съемка выявила два участка с отличающимися характеристиками дна (суммарно занимают не более 1,8% общей площади залива), где, предположительно, ранее были расположены садки (Фация 6 – переходная между Фациями 4 и 5). Последнее отражается на состоянии поверхности дна, что, в частности, доказывается увеличением мощности верхнего слоя дна на акустических изображениях, изменением формы поверхностных объектов и цветовой насыщенности на сонограммах с локатора бокового обзора.

Сложность рельефа залива определила наличие участков с узкими проливами, где гидродинамическая активность выше. На этих участках отмечено повышение неровности поверхности дна на акустических съемках, видеосъемка также указала на повышенную мутность воды у дна. В связи с этим дно пролива в юго-западной части залива Мусталахти было выделено в отдельную ланд-

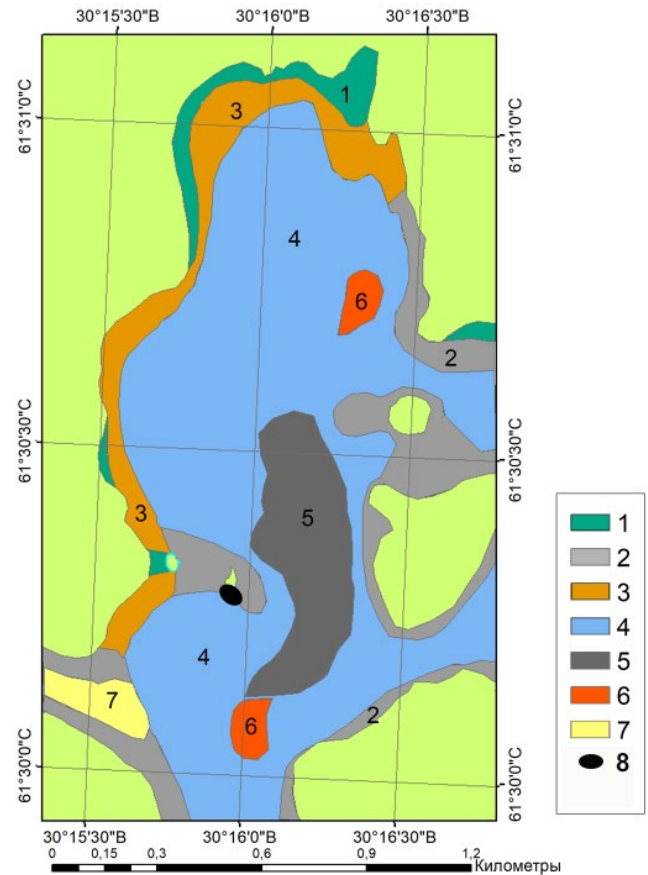


Рис.10. Ландшафтные фации бухты Мустасаари
Примечание:

1. Заросли макрофитов – до 3 м;
2. Скальные выходы, открытые в минимальных глубинах, занесенные тонким слоем наносов на глубине от 0 до 15 м);
3. Прибрежные участки до глубин около 5 м с мягкими илами и часто встречающимися древесными стволами на поверхности;
4. Ненарушенные илы от 5 до 30 м;
5. Дно в зоне влияния садков с участками покрытыми бактериальной пленкой; h от 20 до 27 м;
6. Участки дна с измененной поверхностью от факторов непонятого происхождения (возможно, места, где локализовались старые садки) с h 19-20 и 32-33 м;
7. Взрыхленное дно в проливе между островами на 21-22 м;
8. Коллювий в основании открытых скальных выходов на 5-9 и 21-22 м.

шафтную фацию (Фация 7), занимающую небольшую площадь (1,6%). В основании коренного поднятия в западной части залива выявлен коллювий. Повышение сложности пространства за счет обломков разной крупности и заполнение пространства между ними мягкими отложениями создает комплекс, отличающийся от других мест. Этот небольшой участок (0,1% от общей площади) выделен также в отдельную фацию (Фация 8).

Обсуждая полученные данные, стоит отметить следующее. Классически для исследований влияния объектов аквакультуры используют различные методы мониторинга при выявлении воздействия на окружающую среду, которые различаются по стоимости и требуемым знаниям: (1) визуальные исследования дайверов, (2) анализ фауны, (3)

анализ химического состава донных отложений и (4) фотофиксация профиля донных отложений (Sediment Profile Imagery SPI). Результаты показывают, что все методы согласованы в общей «зоне воздействия» под садками и непосредственно рядом с ними. Однако каждый из методов отличался своей чувствительностью при обнаружении более тонких воздействий на больших расстояниях от садков (Carroll et al., 2003). В нашем случае дополнительным значимым методом из арсенала ландшафтных методов был метод гидроакустической съемки дна и характера его поверхности при «боковом» сканировании. Для пространственных оценок, этот метод, как представляется нами, показывает себя очень перспективным и точным. Это предположение требует верификации и проведения дальнейших работ.

4. Заключение

Использование ландшафтного подхода с его спектром исследований позволило комплексно объединить несколько методов и использовать данные дистанционного зондирования, что в целом представляет собой новый подход к изучению влияния рыбоводных хозяйств на состояние водоема, практически не использовавшийся ранее для пресноводных водоемов.

Полученные данные показали, что применение ландшафтного подхода со всем комплексом современных дистанционных методов, позволяет по-новому взглянуть на проблему антропогенного влияния на окружающую среду деятельности объектов аквакультуры. Исследования, проведенные в зоне воздействия форелевого хозяйства, показали, что последнее вносит свой значительный вклад в изменение состава донных ландшафтов. На примере изученного объекта, площадь дна, занятая антропогенно-измененным ландшафтом, может занимать достаточно обширную долю площади участка водоема, где располагаются садки. С учетом структурных и материально-энергетических взаимосвязей следует учитывать возможность трансформирующего влияния данного элемента ландшафта на весь залив в целом. Поднимаемый вопрос требует дальнейшего изучения.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю признательность директору Санкт-Петербургского Научного центра РАН М.И. Орловой и СПбНЦ РАН за предоставленное оборудование, использованного при проведении данных работ (гидролокатор бокового обзора ГЛБО SOLIX 10), ведущему геологу ООО «Кивиярви» С.Н. Юдину за составление геологической схемы участка, оцифровку и интерпретацию геологических и геофизических данных, а также ведущему инженеру Лаб. гидробиологии ИНОЗ РАН–СПбФИЦ РАН М.О. Дудакову за неоценимое содействие в проведении полевого этапа настоящего исследования, в т.ч. помощь в подготовке оборудования, отборе донных отложений и проведении видеосъемки дна.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов.

Соблюдение этических норм

Все применимые этические нормы соблюдены.

Финансирование

Исследование выполнено за счёт средств гранта РНФ 23-24-00202 «Сезонная динамика геохимических характеристик донных отложений и биологических сообществ природных водоемов в зоне влияния садковых форелевых хозяйств».

Список литературы

- Andrés J. 2011. Use of side scan sonar (SSS) in the management of fisheries and aquaculture: Examples of application in Andalusia, Spain. *Instrumentation Viewpoint* 11: 76.
- Brooks K.M., Stierns A.R., Mahnken C.V.W. et al. 2003. Chemical and biological remediation of the benthos near Atlantic salmon farms. *Aquaculture* 219(1): 355-377. DOI: [10.1016/S0044-8486\(02\)00528-8](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(02)00528-8)
- Carroll M.L., Cochran S., Fieler R. et al. 2003. Organic enrichment of sediments from salmon farming in Norway: environmental factors, management practices, and monitoring techniques. *Aquaculture* 226(1): 165-180. DOI: [10.1016/S0044-8486\(03\)00475-7](https://doi.org/10.1016/S0044-8486(03)00475-7)
- Che Hasan R., Ierodionou D., Laurenson L. et al. 2014. Integrating multibeam backscatter angular response, mosaic and bathymetry data for benthic habitat mapping. *PLOS ONE* 9(5): e97339. DOI: [10.1371/journal.pone.0097339](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097339)
- Cochrane G.R., Lafferty K.D. 2002. Use of acoustic classification of side-scan sonar data for mapping benthic habitat in the Northern Channel Islands, California. *Continental Shelf Research* 22(5): 683-690. DOI: [10.1016/S0278-4343\(01\)00089-9](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(01)00089-9)
- Dougall N., Black K. 2001. Determining sediment properties around a marine cage farm using acoustic ground discrimination: RoxAnn™. *Aquaculture Research* 30(6): 451-458. DOI: [10.1046/j.1365-2109.1999.00351.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2109.1999.00351.x)
- Elvines D.M., MacLeod C.K., Ross D.J. et al. 2024. Fate and effects of fish farm organic waste in marine systems: Advances in understanding using biochemical approaches with implications for environmental management. *Reviews in aquaculture* 16(36): 66-85. DOI: [10.1111/raq.12821](https://doi.org/10.1111/raq.12821)
- Farabi S.M.V., Golaghaei M., Sharifian M. et al. 2022. Effects of rainbow trout farming on water quality around the sea farms in the south of the Caspian Sea. *Caspian Journal of Environmental Sciences* 20(4): 729-737. DOI: [10.22124/CJES.2022.5725](https://doi.org/10.22124/CJES.2022.5725)
- Fish J.P., Carr H.A. 1990. Sound underwater images. A guide to the generation and interpretation of side-scan sonar data. Orleans: Lower Cape Publishing.
- Foster G., Walker B.K., Riegl B.M. 2009. Interpretation of Single-Beam Acoustic Backscatter Using Lidar-Derived Topographic Complexity and Benthic Habitat Classifications in a Coral Reef Environment. *Journal of Coastal Research* 53(6): 16-26. DOI: [10.2112/SI53-003.1](https://doi.org/10.2112/SI53-003.1)
- 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)

Harris P.T., Baker E.K. 2012. Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat: GEOHAB Atlas of Seafloor Geomorphologic Features and Benthic Habitats – Synthesis and Lessons Learned. In: Harris P.T., Baker E.K. (Eds.), GEOHAB Atlas of Seafloor Geomorphologic Features and Benthic Habitats. 1st edition. Cambridge, pp. 871-890. DOI: [10.1016/B978-0-12-814960-7.00060-9](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814960-7.00060-9)

Kalantzi I., Karakassis I. 2006. Benthic impacts of fish farming: Meta-analysis of community and geochemical data. *Marine pollution bulletin* 52(5): 484-493. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2005.09.034](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2005.09.034)

Kristmundsson J., Patursson O., Potter J. et al. 2023. Fish Monitoring in Aquaculture Using Multibeam Echosounders and Machine Learning. *IEEE Access* 99: 1-1. DOI: [10.1109/ACCESS.2023.3320949](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3320949)

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(1): 654-660. DOI: [10.1016/j.aaf.2022.09.003](https://doi.org/10.1016/j.aaf.2022.09.003)

Quintino V. 2003. Benthic biotopes remote sensing using acoustics. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 285-286(4): 339-353. DOI: [10.1016/S0022-0981\(02\)00536-1](https://doi.org/10.1016/S0022-0981(02)00536-1)

Ridgway J.L., Madsen J.A., Fischer J.R. et al. 2024. Side-scan sonar as a tool for measuring fish populations: current state of the science and future directions. *Fisheries* 49(10): 449-500. DOI: [10.1002/fsh.11137](https://doi.org/10.1002/fsh.11137)

Rooney R.C., Podemski C.L. 2009. Effects of an experimental rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) farm on invertebrate community composition. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 66(11): 1949-1964. DOI: [10.1139/F09-130](https://doi.org/10.1139/F09-130)

Villnäs A., Perus J., Bonsdorff E. 2011. Structural and functional shifts in zoobenthos induced by organic enrichment — Implications for community recovery potential. *Journal of Sea Research* 65(1): 8-18. DOI: [10.1016/j.seares.2010.06.004](https://doi.org/10.1016/j.seares.2010.06.004)

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

Госгеолкарта-200. Листы Р-35-XXIV, Р-36-ХГеоморфологическая схема IX.. Третье поколение Балтийская серия ие.. 2015. СПб: Картфабрика ВСЕГЕИ.

Дудакова Д.С., Анохин В.М., Поздняков Ш.Р. и др. 2021. Подводные ландшафты островов Мантсинсаари и Лункулансаари в зоне рифейских поднятий в восточной части Ладожского озера. *Известия Российской академии наук. Серия географическая* 85(3): 433-445. DOI: [10.31857/S2587556621030043](https://doi.org/10.31857/S2587556621030043)

Дудакова Д.С., Капустина Л.Л., Митрукова Г.Г. и др. 2024. Состояние планктонных и бентосных сообществ шхерного района Ладожского озера вблизи садковых рыбоводных хозяйств. *Труды ВНИРО* 196: 163-178. DOI: [10.36038/2307-3497-2024-196-163-178](https://doi.org/10.36038/2307-3497-2024-196-163-178)

Зуйкова Ю.Л., Шилова Т.М. 2000. Геологический отчет, ТЭД, ТЭО, ТЭС. 27064. Составление сводных аэро-геофизических карт на Ладожско-Онежскую площадь в масштабе 1:200000 в 1995-2000 годах. СПб: ГП ПГЭ.

Инструкция по организации и проведению геологической съемки шельфа масштаба 1:200000 (ГСШ-200). 1995. Утв. Роскомнедра 17.06.94. Москва; Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ.

Методические рекомендации по сбору и обработке материалов при гидробиологических исследованиях. 1983. Зообентос и его продукция. Ленинград: ГосНИОРХ.

Милянчук Н.П., Ильмаст Н.В., Стерлигова О.П. и др. 2019. Рыбное население Сямозера в районе форелевого хозяйства. *Труды Карельского научного центра РАН* 11: 42–49.

Рыжков Л.П., Дзюбук И.М., Горохов А.В. и др. 2011. Состояние водной среды и биоты при функционировании садковых форелевых хозяйств. *Водные ресурсы* 38(2): 244-252. DOI: [10.1134/S0097807811020138](https://doi.org/10.1134/S0097807811020138)

Семенович Н.И. 1966. Донные отложения Ладожского озера. Москва; Ленинград: Наука.

Субетто Д.А., Игнатьева Н.В., Давыдова Н.Н. и др. 2002. Донные отложения и их роль в оценке эволюции Ладожского озера. В: Румянцев В.А., Дробкова В.Г. (ред.), *Ладожское озеро: прошлое, настоящее, будущее*. Санкт-Петербург, С. 122-164.