

Hydroacoustic studies of macrozooplankton in Lake Baikal

Makarov M.M.¹, Dzyuba E.V.*¹, Zaydykov I.Yu.¹, Naumova E.Yu.¹

Limnological Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya Str., 3, Irkutsk, 664033, Russia

ABSTRACT. A hydroacoustic survey of the distribution of aggregations of *Macrohectopus branickii* (Amphipoda) in Barguzinsky Bay of Lake Baikal was conducted for the first time in the last 30 years. The hydroacoustic complex “Echo-Baikal” was used in the research. Verification of hydroacoustic data is based on the results of synchronous net catches with a JOM net. The present study demonstrates that macrohectopus aggregations are confined to slope zone areas with depths of 100–150 m. The dependence between the strength of the mean volume backscattering and the density of macrohectopus was obtained, based on which its biomass in Barguzinsky Bay was estimated at $2.7 \cdot 10^6$ kg.

Keywords: Lake Baikal, *Macrohectopus branickii*, biomass, hydroacoustics

For citation: Makarov M.M., Dzyuba E.V., Zaydykov I.Yu., Naumova E.Yu. Hydroacoustic studies of macrozooplankton in Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 6. - P. 1491-1502. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1491

1. Introduction

The pelagic amphipod species of Lake Baikal *Macrohectopus branickii* (Dybowski, 1874) dominates in the lake ecosystem (Rudstam et al., 1992) and is a food resource for fish and mammals (Watanabe et al., 2020; Didorenko et al., 2020; Petrov et al., 2021). It is known that planktonic animals can form aggregations under the influence of various factors (temperature, illumination, wind mixing, etc.). The changes in behavioral patterns, in particular the amplitude of migrations, are one of the mechanisms of their adaptation to a dynamic habitat (Sato and Benoit-Bird, 2019). *M. branickii* is the only representative of the macrozooplankton of Lake Baikal, individuals of which form dense aggregations that perform active migrations, which complicates research and resource work.

Zooplankton of Lake Baikal is traditionally studied by sampling with nets of various designs (Karnaukhov et al., 2019; Naumova et al., 2020; Karnaukhov et al., 2021). Modern remote sensing methods, including hydroacoustic ones, are widely used worldwide for research and monitoring of fish (Briseño-Avena et al., 2015; Føre et al., 2018; Lertvilai, 2020; Mallet et al., 2021; Chacate et al., 2024) and various species of invertebrates (Dunn et al., 2022; Lertvilai and Jaffe, 2022; Oh et al., 2023; Liu and Tang, 2024). The hydroacoustic method, in combination with classical net sampling, is recognized as a reliable tool for monitoring the abundance and biomass of macrozoo-

plankton in large lakes (Megard et al., 1997; Hembre and Megard, 2003; Holbrook et al., 2006).

M. branickii is not only the main component of the diet of the Baikal omul *Coregonus migratorius* (Georgi 1775), but also its competitor in the consumption of zooplankton, and, due to its high biomass, it is a key link in the trophic network of the lake's pelagic zone. It was previously shown that the total consumption of *M. branickii* by pelagic fish species significantly exceeds its production (Mel'nik et al., 1995). The annual production of *M. branickii*, calculated on the basis of daily biomass increments (B/I coefficients), is 330 thousand tons, with the total biomass of this species in the lake being 110 thousand tons (Beckman and Afanasyeva, 1977). Previous studies of the distribution of *M. branickii* using the hydroacoustic method in Barguzinsky Bay of Lake Baikal were conducted in 1988 and 1989 (Rudstam et al., 1992; Melnik et al., 1993).

As a result of the decrease in the number of the Baikal omul, a ban on its industrial and recreational fishing was introduced in October 2017 (Order..., 2017). One of the main limiting factors affecting fish productivity is the thermal regime of the water column, which determines the state of the food supply (Smirnov et al., 2015). The decrease in the number of the Baikal omul in traditional fishing areas (Sokolov and Peterfeld, 2018) is likely associated with a reduction in the biomass of macrozooplankton. This showed the relevance of developing quantitative accounting methods and the need to assess the resources of *M. branickii*.

*Corresponding author.

E-mail address: e.dzyuba@lin.irk.ru (E.V. Dzyuba)

Received: October 22, 2024; **Accepted:** November 29, 2024;

Available online: December 25, 2024

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



The aim of this research is to obtain the dependence of the mean volume backscattering strengths and the biomass density of *M. branickii* to assess its reserves in Barguzinsky Bay of Lake Baikal.

2. Materials and Methods

The work was carried out in the waters area of Barguzinsky Bay of Lake Baikal at a local site of 67 km² (Fig. 1). Hydroacoustic survey was carried out from the shipboard of R/V “G.Yu. Vereshchagin” on August 13-14, 2021 using the hydroacoustic complex “Echo-Baikal” (Makarov et al., 2020). The total length of the acoustic tacks was 158 km, of which 76 km were completed during the daytime and 82 km at night. The hydroacoustic complex was adjusted for two-frequency operation mode with the following parameters: probing signal frequency was set at 28 and 200 kHz, directional pattern at -3 dB level, 20.9° and 12° respectively, pulse duration at 1.0 ms, integration threshold at -86 dB. Hydroacoustic antennas were located on an external tow on the left side of the research vessel, at the depth of 1.5 m in a streamlined steel hull. The hydroacoustic complex was calibrated in accordance with the standard method (Simrad, 2003) using a copper sphere with a diameter of 60 mm with a calculated target strength (*TS*) value at a frequency of 200 kHz equal to -33.61 dB.

Hydroacoustic data was processed using the EchoView software package (Myriax Software, Australia). The vertical was divided into six horizontal layers, excluding acoustic interference from the surface and bottom of the lake. The signal was integrated every 500 m of the traveled distance, which is equivalent to 3.2 min at a vessel speed of 5 knots. In this way, the value of the mean volume backscattering strengths (*MVBS*) was obtained for each integration interval. The original acoustic data was corrected, using corrections for energy loss due to sound propagation and attenuation, the latter were calculated in accordance with the absorption coefficient for each frequency (28 and 200 kHz), and water temperature was also taken into account. Integration thresholds were used to exclude very low values of the volume backscattering strength, in cases where, despite the presence of scatterers, they were close to the internal minimum of the hydroacoustic system. The maximum *MVBS* values for the areas without sound scattering layers - SSLs were used as threshold values, and only values higher than this were used in the subsequent analysis. Fragments with high *MVBS* values caused by scattering from fish were removed from the echo integration area. For this purpose, the data of the low-frequency echo sounder channel (28 kHz) was analyzed, on which the signals from fish were clearly distinguished (for example, the average *TS* estimates for the Baikal omul are within the range of values from -43 to -34 dB). Fragments of the hydroacoustic recording in which individual fish and aggregations were identified, were excluded from further analysis.

At each station, vertical hydrophysical profiling was performed with a CTD probe Rinko AAQ-177

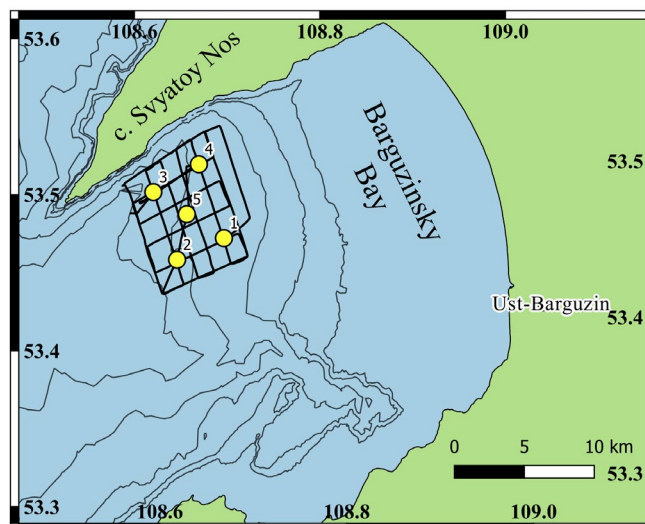


Fig.1. Area of hydroacoustic research: 1-5 – sampling stations, — hydroacoustic tacks, isobaths are indicated for depths of 50, 100, 200, 500 and 1000 m.

(Japan) to a depth of 100 m. Data on surface water temperature on August 14, 2021 were obtained using the MODIS satellite system (Table). Macrozooplankton samples were collected simultaneously with the hydroacoustic survey (Table). When collecting samples, a JOM closing net with an inlet diameter of 82 cm and a filter sieve mesh size of 160 μm was used. The exact positioning of the net by depth was determined, using an RBR Duet submersible probe (Canada) attached to it. Net samples were collected at five stations: 4 samples during the day and 1 sample during the night, in two layers of 0-100 and 100-300 m. After fixation with 4% formalin, *M. branickii* individuals were counted, their body length was measured and their gender was determined. The measured body length was used to calculate biomass according to the length-mass regression $W = 0.047 \cdot L^{2.39}$, as in the works (Rudstam et al., 1992; Melnik et al., 1993).

The results of net sampling from different depths for each station were combined to obtain additional integral values of the biomass density from maximum depths to the surface. In total, 15 values of the *M. branickii* biomass density were obtained for the hydroacoustic survey area (Table: integral values are highlighted in bold).

To assess the relationship between *MVBS* and the actual density of *M. branickii* biomass, the *MVBS* values were analyzed in the layers where the net sampling was performed. The density values recalculated to a cubic meter were compared with the *MVBS* value at the net sampling points. In further work, the obtained relationship $MVBS = -73.18 + 10.24 \cdot \log_{10} W$ ($r^2 = 0.75$) was used, where *MVBS* is the mean volumetric backscattering, *W* is the density in mg/m³ (Fig. 2).

3. Results and discussion

Vertical distribution of sound scattering layers. During the hydroacoustic survey, dense SSLs were detected at a frequency of 200 kHz. At a frequency of 28 kHz, SSLs were not recorded or were at the noise

Table. Comparison of net sampling data, hydrophysical parameters and acoustic measurements in Barguzinsky Bay on 13-14.08.2021.

Station No.	Water surface temperature, °C	Time of day	Bottom depth, m	Fishing depth, m	Biomass		MVBS, dB
					g/m ²	mg/m ³	
1	14.3	04:35	343	0-55	4.36	79.3	-55.8
		04:50	343	55-165	15.9	144.6	-48.9
				0-165	20.3	122.9	-50.1
2	15.2	12:30	625	0-85	2.87	33.8	-58.3
		12:45	600	85-250	4.38	26.6	-59.8
				0-250	7.25	29.0	-59.3
3	15.4	8:20	835	0-100	2.01	20.1	-59.4
		8:50	935	100-300	10.4	52.0	-58.3
				0-300	12.4	41.4	-58.6
4	16.3	9:42	454	0-85	8.69	102.3	-52.2
		9:55	466	85-220	14.1	104.5	-53.2
				0-220	22.8	103.6	-52.8
5	17.3	11:30	459	0-85	1.43	16.8	-57.0
		11:40	462	85-250	10.3	62.3	-53.8
				0-250	11.7	46.8	-54.5

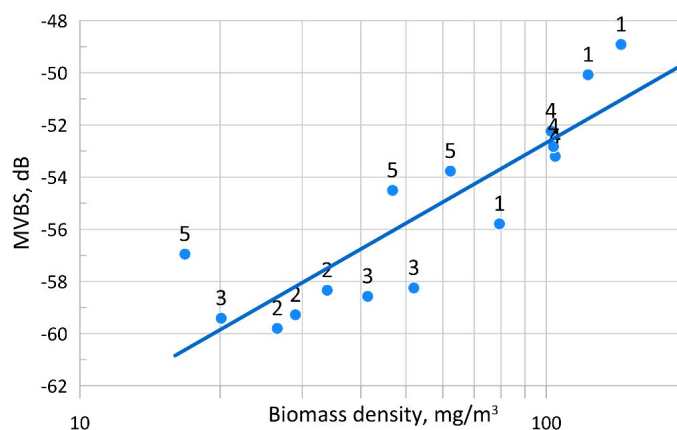
level. Very low estimates of target strength for macrozooplankton predicted at frequencies of 120 and 38 kHz, -101 and -113 dB, respectively (Greenlaw, 1977), mean that even with biomass density recorded in net samples up to 123 mg/m³, MVBS is close to the threshold values of the hydroacoustic system.

During the daytime, two dense SSLs were recorded at depths from 0 to 300 m: from 0 to 80 and from 80 to 250 m, respectively (Fig. 3A). The upper layer was characterized by MVBS values from -72.47 to -54.06 dB (mean -61.11 dB), which corresponded to biomass densities from 1.17 to 73.65 mg/m³ (mean 15.09 mg/m³). The denser lower layer was characterized by MVBS values from -66.61 to -42.97 dB (-58.19 dB), which corresponded to biomass densities from 4.38 to 891.65 mg/m³ (29.10 mg/m³). Control samples showed that the SSLs consisted mainly of *M. branickii*: the upper layer consisted of individuals 6-15 mm long, and the lower layer consisted of juveniles and males up to 5 mm, as well as females over 15 mm long. Earlier, the hydroacoustic observations in Barguzinsky Bay of Lake Baikal showed that daytime aggregations of *M. branickii* were recorded at depths from 70 to 120 m (Mel'nik et al., 1995), which, according to our data, corresponds to the lower layer of the SSLs (Fig. 3, 4).

At night, the maximum depth of SSLs recording reached 250-300 m. *M. branickii* dispersed from the surface to depths of 200-250 m (Fig. 3B). The SSLs density was uneven with a maximum at a depth of 10-30 m, which was evidenced by an increase in the MVBS value from -69.56 to -46.64 dB (-56.35 dB), which corresponded to a biomass density of 2.26 to 390.66 mg/m³ (44.01 mg/m³). At depths of 50-200 m, MVBS corresponded to values from -73.49 to -52.07 dB (-64.89 dB), which corresponds to a biomass density of 0.93 to 115.22 mg/m³ (6.45 mg/m³). As we approached the shore, the depth decreased, which led to the concentra-

tion of the SSLs and an increase in density to maximum values.

The CTD data obtained for each station showed that the temperature profile was typical for this time of year (Fig. 4). The section of the vertical profile at a depth of 40-50 m with a water temperature of 4.0-4.5 °C can be characterized as a thermocline zone in which the recorded SSLs was located. We assume that in this water column, following a sharp decrease in temperature, there is an increase in water density, which is perceived by planktonic animals as a "solid" boundary and contributes to the formation of dense clusters. The SSLs recorded at a depth of 25-50 m, is reflected in the vertical profiles of chlorophyll-*a*, and dissolved oxygen, in the form of local maxima (Fig. 4). In general, a high concentration of dissolved oxygen in the water at all depths with an average value within the range from 9 to 14.5 mg/l is typical for Lake Baikal (Domysheva et al., 2016).

**Fig.2.** The relationship of MVBS and biomass density: 1-5 – stations.

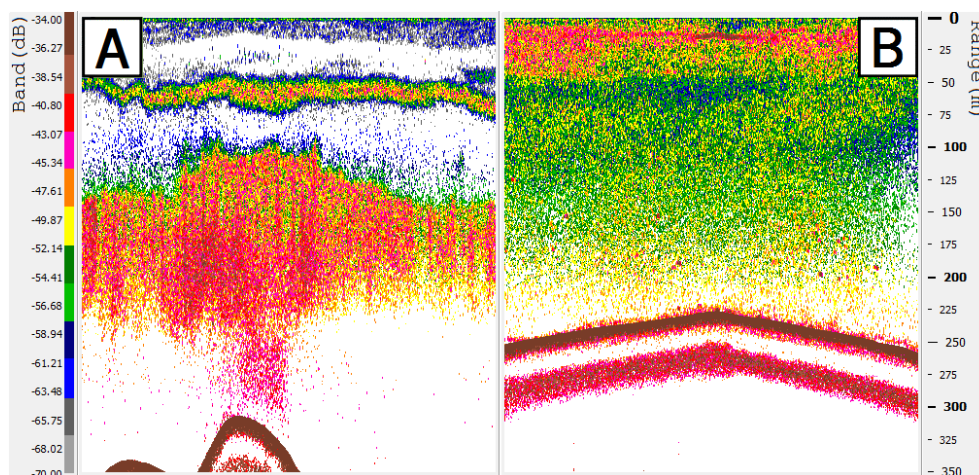


Fig.3. Echogram of the SSLs distribution: during the day (A) and at night (B).

Horizontal distribution of the SSLs. The relationship of *MVBS* and the *M. branickii* biomass density obtained in our work $MVBS = -73.2 + 10.2 \cdot \text{Log}_{10} W$ ($r^2 = 0.75$), is close to the regression obtained earlier (Rudstam et al., 1992), $MVBS = -66.8 + 10.9 \cdot \text{Log}_{10} W$ ($r^2 = 0.72$), where *MVBS* is the average volume backscattering, *W* is the biomass density in mg/m^3 . The difference in the regression coefficients can be explained by the differences in the *M. branickii* biomass density that we obtained from the net samples. The average value of the biomass density for daytime stations in our work is $65.7 \text{ mg}/\text{m}^3$, and in the work (Rudstam et al., 1992) – $169.5 \text{ mg}/\text{m}^3$. The maximum biomass density also differs; in our work it did not exceed $123 \text{ mg}/\text{m}^3$, whereas in the work (Rudstam et al., 1992) there were values of over $1200 \text{ mg}/\text{m}^3$. The minimum estimates of biomass density were comparable and corresponded to values of $10\text{-}20 \text{ mg}/\text{m}^3$. Our findings confirm that the sizes of *M. branickii* individuals in plankton nets are consistent with those reported by L.G. Rudstam et al. (1992).

We used the obtained relationship to estimate the biomass density distribution in the area of the hydroacoustic survey, using acoustic data. The area of the surveyed water area was 67 km^2 , which corresponds to 16% of the bay area that is of 415 km^2 deeper than the 50 m isobath. The *MVBS* values along individual tracks were different. For example, over greater depths, deeper than the 500 m isobath, the *MVBS* corresponded to a value of -62.2 dB , which, when converted to the density of the *M. branickii* accumulation, was $12.3 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($2.9 \text{ g}/\text{m}^2$). At the stations with the highest *MVBS* estimates and based on the results of plankton net, values of -48.9 dB were recorded, which corresponds to a aggregation density of $144 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($34 \text{ g}/\text{m}^2$), while the average *MVBS* estimate for the surveyed area was -58.8 dB , i.e. $25.4 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($5.9 \text{ g}/\text{m}^2$). Consequently, the total biomass of *M. branickii* in the surveyed water area is $0.39 \cdot 10^6 \text{ kg}$.

The distribution of biomass density over the surveyed water area is not uniform. It should be noted, that aggregations were mainly observed along the 300-100 m isobaths in the eastern part (Fig. 5A), possibly caused by the influence of the Barguzin River waters. In Barguzinsky Bay, the system of currents leads to

the transfer of river waters from the mouth along the northern shore, i.e. along the Svyatoy Nos peninsula (Sorokovikova et al., 2010). However, the temperature map (Fig. 5B) and CTD probing data (Fig. 4) did not show the influence of river water.

The obtained data allow us to estimate the biomass of *M. branickii* for the entire bay. Based on the average estimate of the biomass density for the surveyed polygon of $25.4 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($5.9 \text{ g}/\text{m}^2$), for the entire water area of the bay, deeper than the 50 m isobath, the total biomass of *M. branickii* is $2.7 \cdot 10^6 \text{ kg}$. According to L.G. Rudstam et al. (1992), it was estimated at $3.7 \cdot 10^6 \text{ kg}$, which is 27% more than our estimates. The differences are explained by the fact that there were more significant catches in plankton nets, which means there were larger stocks of *M. branickii* in 1988 and 1989. M.Yu. Beckman and E.L. Afanasyeva (1977) make an estimate of the total biomass of *M. branickii* of $110 \cdot 10^6 \text{ kg}$ ($15.7 \text{ mg}/\text{m}^3$ or $3.7 \text{ g}/\text{m}^2$) for the entire Lake Baikal, the area of which is 29.746 km^2 below the 50 m isobath. Extrapolation of these data to the area of Barguzinsky Bay yields a total biomass value of about $1.53 \cdot 10^6 \text{ kg}$, which is less than the estimate obtained in our work. Thus, our estimate of the total biomass of *M. branickii* is reliable, and its low value indicates a lower abundance and biomass in Barguzinsky Bay compared to the estimate of L.G. Rudstam et al. (1992). Further research is required to confirm this.

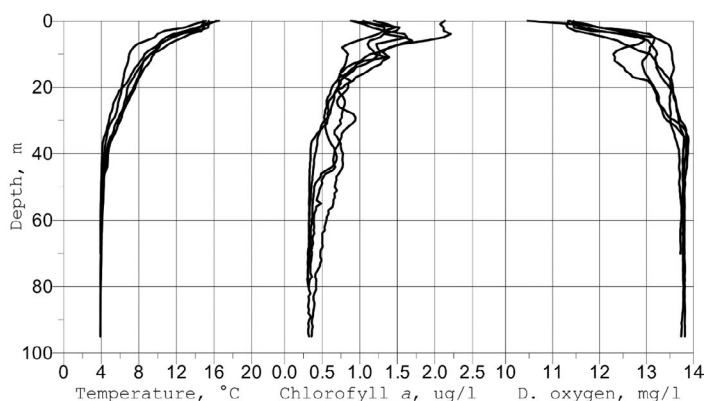


Fig.4. Vertical profiles of temperature, chlorophyll-a, and dissolved oxygen.

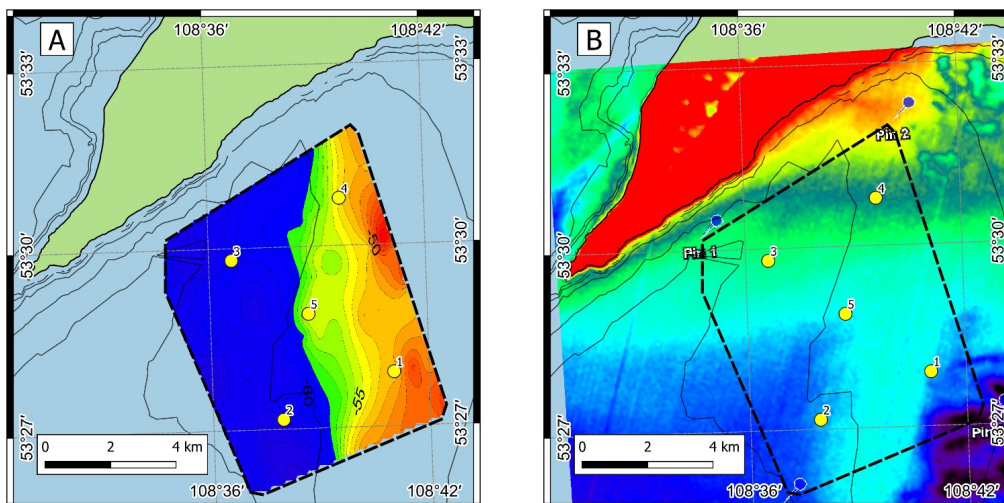


Fig.5. Maps of the distribution of the acoustic density of amphipod aggregations at a depth of 0-250 m (A) and surface temperature according to MODIS data (B), isobaths are shown for depths of 50, 100, 200, 500 and 1000 m.

4. Conclusion

M. branickii is a key species of the lake ecosystem, therefore, up-to-date information on its abundance and biomass, as well as on its distribution and dynamics, is necessary to understand the ecological processes occurring in Lake Baikal at present. The dependence of the average volume backscattering strength and the density of *M. branickii* was obtained, on the basis of which its biomass in Barguzinsky Bay was estimated at $2.7 \cdot 10^6$ kg. The advantage of this integrated approach is shown, as well as the fundamental possibility of conducting an areal survey of the distribution of *M. branickii* clusters throughout the entire water area of Lake Baikal, the results of which will further help to adjust the existing estimates of the abundance and biomass of this species.

The conducted studies show that quantitative assessments of the *M. branickii* biomass in Lake Baikal, using the acoustic method in combination with control catches using plankton nets will contribute to obtaining new knowledge on the ecology of animals. In addition, they will also determine the causes of changes in the distribution of the Baikal omul in areas of traditional fishing.

Acknowledgements

The research was carried out within the State assignments No. 0279-2022-0004 (122012600083-9) and No. 0279-2021-0005 (121032300224-8). The authors are thankful to the crew of the R/V “G.Yu. Vereshchagin” for assistance in sampling the material.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Bekman M.Yu., Afanas'eva E.L. 1977. Distribution and production of *Macrohectopus*. In: Bekman M.Yu. (Ed.), Biological Productivity of the Baikal Pelagic Zone and Its Variability. Novosibirsk, pp. 76-98. (in Russian)

- Briseño-Avena C., Roberts P.L.D., Franks P.J.S. et al. 2015. ZOOPS- O2: A broadband echosounder with coordinated stereo optical imaging for observing plankton *in situ*. Methods in Oceanography 12: 36-54. DOI: [10.1016/j.mio.2015.07.001](https://doi.org/10.1016/j.mio.2015.07.001)
- Chacate O.E., Coetzee J.C., Axelsen B.E. 2024. Hydroacoustic classification and abundance estimation of mesopelagic fish in deep scattering layers (DSL) of the Indian Ocean. ICES Journal of Marine Science 0: 1-15. DOI: [10.1093/icesjms/fsae028](https://doi.org/10.1093/icesjms/fsae028)
- Didorenko S.I., Botvinkin A.D., Takhteev V.V. 2020. A new, original trophic relationship in the Lake Baikal ecosystem: the pelagic amphipod, *Macrohectopus branickii* (Crustacea, Amphipoda) and *Myotis petax* bats (Mammalia, Chiroptera). Russian Journal of Zoology 99(10): 1140-1147. DOI: [10.31857/S0044513420100050](https://doi.org/10.31857/S0044513420100050)
- Domysheva V.M., Pestunov D.A., Sakirko M.V. et al. 2016. Carbon dioxide, oxygen and biogenic elements in the water under ice of the South Baikal littoral. Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics] 29(12): 1073-1079. DOI: [10.15372/AOO20161211](https://doi.org/10.15372/AOO20161211) (in Russian)
- Dunn M.B., Pedersen G., Basedow S.L. et al. 2022. Inverse method applied to autonomous broadband hydroacoustic survey detects higher densities of zooplankton in near-surface aggregations than vessel-based net survey. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 80(3): 451-467. DOI: [10.1139/cjfas-2022-0105](https://doi.org/10.1139/cjfas-2022-0105)
- Føre M., Frank K., Norton T. et al. 2018. Precision fish farming: a new framework to improve production in aquaculture. Biosystems Engineering 173: 176-193. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014)
- Greenlaw C.F. 1977. Backscattering spectra of preserved zooplankton. The Journal of the Acoustical Society of America 62(1): 44-52. DOI: [10.1121/1.381503](https://doi.org/10.1121/1.381503)
- Hembre L.K., Megard R.O. 2003. Seasonal and diel patchiness of a *Daphnia* population: an acoustic analysis. Limnology and Oceanography 48: 2221-2233. DOI: [10.4319/lo.2003.48.6.2221](https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.6.2221)
- Holbrook B.V., Hrabik T.R., Branstrator D.K. et al. 2006. Hydroacoustic estimation of zooplankton biomass at two shoal complexes in the Apostle Islands Region of Lake Superior. Journal of Great Lakes Research 32(4): 680-696. DOI: [10.3394/0380-1330\(2006\)32\[680:HEOZBA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3394/0380-1330(2006)32[680:HEOZBA]2.0.CO;2)
- Karnaikhov D.Yu., Biritskaya S.A., Maslennikova M.A. et al. 2019. The abundance and structure of population of pelagic amphipod *Macrohectopus branickii* in the coastal zone of Lake Baikal. Acta Biologica Sibirica 5(3): 154-158. DOI: [10.14258/abs.v5.i3.6574](https://doi.org/10.14258/abs.v5.i3.6574)

- Karnaikhov D.Yu., Dolinskaya E.M., Biritskaya S.A. et al. 2021. New data regarding ecology of freshwater pelagic amphipod *Macrohectopus branickii* and other crustaceans of plankton from the southern part of Lake Baikal. *Acta Biologica Sibirica* 7: 39-48. DOI: [10.3897/abs.7.e65636](https://doi.org/10.3897/abs.7.e65636)
- Lertvilai P., Jaffe J.S. 2022. *In situ* size and motility measurement of aquatic invertebrates with an underwater stereoscopic camera system using tilted lenses. *Methods in Ecology and Evolution* 13: 1192-1200. DOI: [10.1111/2041-210X.13855](https://doi.org/10.1111/2041-210X.13855)
- Lertvilai P. 2020. The *in situ* plankton assemblage eXplorer (IPAX): an inexpensive underwater imaging system for zooplankton study. *Methods in Ecology and Evolution* 11: 1042-1048. DOI: [10.1111/2041-210x.13441](https://doi.org/10.1111/2041-210x.13441)
- Liu J., Tang Y. 2024. Monitoring two typical marine zooplankton species using acoustic methods in the South China Sea. *Sensors* 24: 4827. DOI: [10.3390/s24154827](https://doi.org/10.3390/s24154827)
- Makarov M.M., Muyakshin S.I., Kucher K.M. et al. 2020. A study of the gas seep Istok in the Selenga shoal using active acoustic, passive acoustic and optical methods. *Journal of Great Lakes Research* 46(1): 95-101. DOI: [10.1016/j.jglr.2019.10.014](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.014)
- Mallet D., Olivry M., Ighiouer S. et al. 2021. Nondestructive monitoring of soft bottom fish and habitats using a standardized, remote and unbaited 360° video sampling method. *Fishes* 6(4): 50. DOI: [10.3390/fishes6040050](https://doi.org/10.3390/fishes6040050)
- Megard R.O., Kuns M.M., Whiteside M.C. et al. 1997. Spatial distributions of zooplankton during coastal upwelling in western Lake Superior. *Limnology and Oceanography* 42: 827-840. DOI: [10.4319/lo.1997.42.5.0827](https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.5.0827)
- Melnik N.G., Timoshkin O.A., Sideleva V.G. et al. 1993. Hydroacoustic measurement of the density of the Baikal macrozooplankton *Macrohectopus branickii*. *Limnology and Oceanography* 38(2): 425-434. DOI: [10.4319/lo.1993.38.2.0425](https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.2.0425)
- Mel'nik N.G., Timoshkin O.A., Sideleva V.G. 1995. Raspredeleniye *M. branickii* i nekotoryye osobennosti yego ekologii [Distribution of *M. branickii* and some features of its ecology]. In: Timoshkin O.A. (Ed.), Atlas i opredelitel' pelagobiontov Baikala (s kratkimi ocherkami po ikh ekologii) [Atlas and Keys to Baikal Pelagobionts (with Brief Essays on Their Ecology)]. Novosibirsk, pp. 511-522. (in Russian)
- Naumova E.Yu., Zaidykov I.Yu., Makarov M.M. 2020. Recent quantitative values of *Macrohectopus branickii* (Dyb.) (Amphipoda) from Lake Baikal. *Journal of Great Lakes Research* 46(1): 48-52. DOI: [10.1016/j.jglr.2019.10.002](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.002)
- Oh W.S., Park G.C., Choi J.H. et al. 2023. Density estimation of euphausiids and copepods by using a multi-frequency method. *Fisheries and Aquatic Science* 26(12): 689-697. DOI: [10.47853/FAS.2023.e61](https://doi.org/10.47853/FAS.2023.e61)
- Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of November 7, 2014 N 435. 2017. «On approval of fishing rules for the Baikal fishery basin». URL: <http://base.garant.ru/70818098/> (accessed 15.01.2020) (in Russian)
- Petrov E.A., Kupchinsky A.B., Fialkov V.A. et al. 2021. The importance of the shore in the life of the Baikal seal (*Pusa sibirica* Gmelin 1788, Pinnipedia) 2. Rookery behavior. *Russian Journal of Zoology* 100(6): 671-685. DOI: [10.31857/S0044513421060106](https://doi.org/10.31857/S0044513421060106)
- Rudstam L.G., Melnik N.G., Timoshkin O.A. et al. 1992. Daily dynamics of an aggregation of *Macrohectopus branickii* (Dyb.) (Amphipoda, Gammaridae) in Barguzin Bay, Lake Baikal Russia. *Journal of Great Lakes Research* 18(2): 286-297. DOI: [10.1016/S0380-1330\(92\)71296-9](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(92)71296-9)
- Sato M., Benoit-Bird K.J. 2019. Biological-physical coupling in a highly adjective ecosystem: Through a lens of diel vertical migration. *The Journal of the Acoustical Society of America* 146 (4): 2898. DOI: [10.1121/1.5137056](https://doi.org/10.1121/1.5137056)
- Simrad A.S. 2003. Reference manual: Simrad EK60. Scientific echo sounder system.
- Smirnov V.V., Smirnova-Zalumi N.S., Sukhanova L.V. et al. 2015. Measures to preserve the stocks of the Baikal omul *Coregonus migratorius*. *Vestnik rybokhozyaystvennoy nauki* [Bulletin of fisheries science] 4: 42-45. (in Russian)
- Sokolov A.V., Peterfeld V.A. 2018. About the reasons of a ban on commercial fishing of omul (*Coregonus autumnalis migratorius*, Georgi) in Lake Baikal in the modern period. In: VII Baltic Maritime Forum. Kaliningrad, pp. 158-164. (in Russian)
- Sorokovikova L.M., Tomberg I.V., Sinyukovich V.N. et al. 2010. Peculiarities of formation of the mixing zone of river and lake waters in Barguzinsky bay of Lake Baikal. In: The Fifth Vereshchagin Baikal Conference, Irkutsk, pp. 256-258.
- Watanabe Y.Y., Baranov E.A., Miyazaki N. 2020. Ultrahigh foraging rates of Baikal seals make tiny endemic amphipods profitable in Lake Baikal. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 117(49): 31242-31248. DOI: [10.1073/pnas.2014021117](https://doi.org/10.1073/pnas.2014021117)

Гидроакустические исследования макрозоопланктона оз. Байкал

Макаров М.М.¹, Дзюба Е.В.*¹, Зайдыков И.Ю.¹, Наумова Е.Ю.¹

Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

АННОТАЦИЯ. Гидроакустическая съемка распределения скоплений макрогектопуса *Macrohectopus branickii* (Amphipoda) в Баргузинском заливе озера Байкал выполнена впервые за последние 30 лет. В работе использован двухчастотный однолучевой гидроакустический комплекс «ЭхоБайкал». Верификация гидроакустических данных выполнена по результатам синхронных сетных ловов планктонной сетью ДжОМ. Показана приуроченность скоплений макрогектопуса к участкам склоновой зоны с глубинами 100-150 м. Получена зависимость силы среднего объемного обратного рассеяния и плотности макрогектопуса, на основе которой его биомасса в Баргузинском заливе оценена в $2,7 \cdot 10^6$ кг.

Ключевые слова: Байкал, *Macrohectopus branickii*, биомасса, гидроакустика

Для цитирования: Макаров М.М., Дзюба Е.В., Зайдыков И.Ю., Наумова Е.Ю. Гидроакустические исследования макрозоопланктона оз. Байкал // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 6. - С. 1491-1502. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1491

1. Введение

Пелагический вид амфипод Байкала – макрогектопус *Macrohectopus branickii* (Dybowsky 1874) доминирует в экосистеме озера (Rudstam et al., 1992) и является кормовым ресурсом рыб, а также млекопитающих (Watanabe et al., 2020; Дидоренко и др., 2020; Петров и др., 2021). Известно, что планктонные животные могут образовывать скопления под действием разнообразных факторов (температура, освещенность, ветровое перемешивание и др.). Смена поведенческих паттернов, в частности амплитуды миграций, является одним из механизмов их адаптации к динамичной среде обитания (Sato and Benoit-Bird, 2019). Макрогектопус является единственным представителем макрозоопланктона озера Байкал, особи которого образуют плотные скопления, совершающие активные миграции, что осложняет проведение исследовательских и ресурсных работ.

Зоопланктон оз. Байкал традиционно изучается с помощью отбора проб сетями различных конструкций (Карнаухов и др., 2019; Naumova et al., 2020; Karnaukhov et al., 2021). Современные дистанционные методы, включая гидроакустические, широко применяются в мире для исследований и мониторинга рыб (Briseño-Avena et al., 2015; Føre et al., 2018; Lertvilai, 2020; Mallet et al., 2021; Chacate et

al., 2024) и различных видов беспозвоночных животных (Dunn et al., 2022; Lertvilai and Jaffe, 2022; Oh et al., 2023; Liu and Tang, 2024). Гидроакустический метод, в сочетании с классическими сетными ловами, признан надежным инструментом мониторинга численности и биомассы макрозоопланктона в больших озерах (Megard et al., 1997; Nembre and Megard, 2003; Holbrook et al., 2006).

Макрогектопус не только основной компонент питания байкальского омуля *Coregonus migratorius* (Georgi 1775), но и его конкурент в потреблении зоопланктона, а, благодаря высокой биомассе – ключевое звено в трофической сети пелагиали озера. Ранее было показано, что общее потребление макрогектопуса пелагическими видами рыб значительно превышает его продукцию (Мельник и др., 1995). Годовая продукция макрогектопуса, рассчитанная на основе суточных приростов биомассы (П/Б коэффициентов), составляет 330 тыс. т, при общей биомассе этого вида в озере 110 тыс. т (Бекман и Афанасьева, 1977). Предыдущие исследования распределения макрогектопуса с использованием гидроакустического метода в Баргузинском заливе озера Байкал проводились в 1988 и 1989 гг. (Rudstam et al., 1992; Melnik et al., 1993).

В результате снижения численности байкальского омуля, с октября 2017 г. был введен запрет на его промышленный и любительский вылов

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: e.dzuba@lin.irk.ru (Е.В. Дзюба)

Поступила: 22 октября 2024; Принята: 29 ноября 2024;
Опубликована online: 25 декабря 2024

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



(Приказ ..., 2017). Одним из основных лимитирующих факторов, влияющих на продуктивность рыб, является термический режим водной толщи, определяющий состояние кормовой базы (Смирнов и др., 2015). Предполагается, что одной из причин снижения численности, а также изменений в характере распределения байкальского омуля в районах традиционного промысла (Соколов и Петерфельд, 2018) может являться снижение биомассы макрозоопланктона. Это показало актуальность развития методов количественного учета и необходимость оценки ресурсов макрогектопуса. Цель исследования: получение зависимости силы среднего объемного обратного рассеяния и плотности биомассы макрогектопуса для оценки его запасов в Баргузинском заливе озера Байкал.

2. Материалы и методы

Работы проводили в акватории Баргузинского залива озера Байкал на локальном участке площадью 67 км² (Рис. 1). Гидроакустическую съемку выполняли с борта научно исследовательского судна «Г.Ю. Верещагин» 13-14 августа 2021 г. при помощи гидроакустического комплекса «Эхо-Байкал» (Makarov et al., 2020). Общая протяженность акустических галсов составила 158 км, из которых в дневное время – 76 км, а в ночное – 82 км. Комплекс настраивали на двухчастотный режим работы со следующими параметрами: частота зондирующего сигнала 28 и 200 кГц, длительность импульса 1,0 мс, порог интегрирования -86 дБ. Гидроакустические антенны располагали на выносной штанге по левому борту НИС, на глубине 1,5 м в обтекаемом стальном корпусе. Калибровку гидроакустического комплекса выполняли по стандартной методике (Simrad, 2003) при помощи медной сферы диаметром 60 мм с расчетным значением силы цели (TS) на частоте 200 кГц равным -33,61 дБ.

Гидроакустические данные обрабатывали в программном комплексе EchoView (Myriax Software, Australia). Вертикаль делили на 6 горизонтальных слоев, исключая акустические помехи от поверхности и дна озера. Сигнал интегрировали каждые 500 м пройденной дистанции, что эквивалентно 3,2 мин при скорости судна 5 узлов. Таким образом получали величину среднего объемного обратного рассеяния для каждого интервала интегрирования, далее – MVBS (англ. Mean volume backscattering strengths). Исходные акустические данные корректировали, используя поправки на потерю энергии за счет распространения и затухания звука, последние рассчитывали в соответствии с коэффициентом поглощения для каждой частоты (28 и 200 кГц), так же учитывали температуру воды. Пороги интегрирования использовали для исключения очень низких значений силы объемного обратного рассеяния, в случаях, когда несмотря на наличие рассеивателей, они были близки к внутреннему минимуму гидроакустической системы. Максимальные значения MVBS для областей без звукорассеивающих слоев (ЗРС) применяли в качестве пороговых значе-

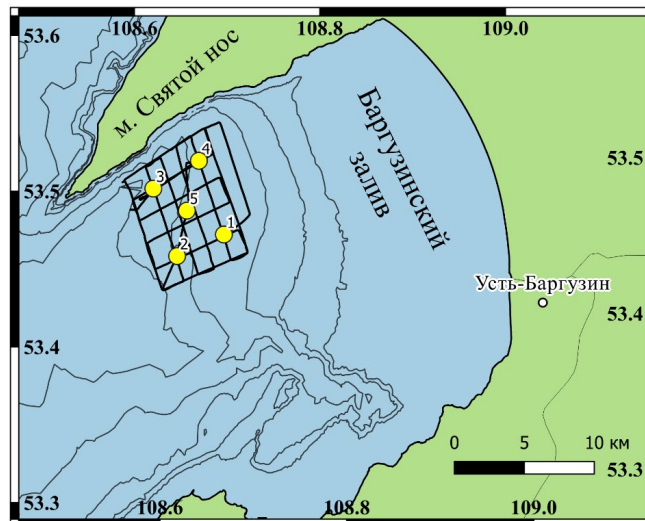


Рис.1. Район проведения гидроакустических исследований: 1-5 – станции отбора проб, — гидроакустические галсы, изобаты указаны для глубин 50, 100, 200, 500 и 1000 м.

ний, и только значения выше использовали в последующем анализе. Из области эхоинтегрирования удаляли фрагменты с высокими значениями MVBS, вызванные рассеянием от рыб. Для этого анализировали данные низкочастотного канала эхолота (28 кГц), на котором сигналы от рыб выделялись отчетливо (например, средние оценки TS для байкальского омуля находятся в диапазоне значений от -43 до -34 дБ). Фрагменты гидроакустической записи в которых идентифицировали отдельных особей и скопления рыб исключали из дальнейшего анализа.

На каждой станции выполняли вертикальное гидрофизическое профилирование CTD зондом Rinko AQQ-177 (Япония) до глубины 100 м. Данные о температуре воды на поверхности 14 августа 2021 г. получали при помощи спутниковой системы MODIS (Таблица). Одновременно с гидроакустической съемкой отбирали пробы макрозоопланктона (Таблица). При отборе проб использовали закрывающуюся сеть ДжОМ с диаметром входного отверстия 82 см и размером ячеей фильтрующего сита 160 мкм. Точное позиционирование работы сети по глубине определяли с помощью прикрепленного к ней погружного зонда RBR Duet (Канада). Сетные пробы собирали на пяти станциях: днем – 4 и ночью -1, в двух слоях 0-100 и 100-300 м. После фиксации 4% формалином, особей макрогектопуса подсчитывали, измеряли длину тела и определяли половую принадлежность. Измеренную длину тела использовали для расчета биомассы в соответствии с регрессией длины и массы $W = 0,047 \cdot L^{2,39}$, как и в работах (Rudstam et al., 1992; Melnik et al., 1993).

Результаты сетных ловов с разных глубин для каждой станции объединяли для получения дополнительных интегральных значений плотности биомассы макрогектопуса от максимальных глубин до поверхности. Всего получили 15 значений плотности биомассы макрогектопуса для района гидроакустической съемки (Таблица: интегральные значения выделены жирным шрифтом).

Таблица. Сравнение данных сетных ловов, гидрофизических параметров и акустических измерений в Баргузинском заливе 13-14.08.2021 г.

Номер станции	Температура поверхности воды, °С	Время суток	Глубина до дна, м	Глубина облова, м	Биомасса		MVBS, дБ
					г/м ²	мг/м ³	
1	14,3	04:35	343	0-55	4,36	79,3	-55,8
		04:50	343	55-165	15,9	144,6	-48,9
				0-165	20,3	122,9	-50,1
2	15,2	12:30	625	0-85	2,87	33,8	-58,3
		12:45	600	85-250	4,38	26,6	-59,8
				0-250	7,25	29,0	-59,3
3	15,4	8:20	835	0-100	2,01	20,1	-59,4
		8:50	935	100-300	10,4	52,0	-58,3
				0-300	12,4	41,4	-58,6
4	16,3	9:42	454	0-85	8,69	102,3	-52,2
		9:55	466	85-220	14,1	104,5	-53,2
				0-220	22,8	103,6	-52,8
5	17,3	11:30	459	0-85	1,43	16,8	-57,0
		11:40	462	85-250	10,3	62,3	-53,8
				0-250	11,7	46,8	-54,5

Для оценки соотношения MVBS с фактической плотностью биомассы макрогектопуса анализировали значения MVBS в слоях, в которых проводили отбор проб сетью. Значения плотности пересчитанные к кубическому метру сопоставляли со значением MVBS в точках сетных ловов. В дальнейшей работе использовали полученное соотношение $MVBS = -73,18 + 10,24 \cdot \log_{10} W$ ($r^2 = 0,75$), где MVBS – среднее объемное обратное рассеяние, W – плотность в мг/м³ (Рис. 2).

3. Результаты и обсуждение

Вертикальное распределение ЗРС. В ходе гидроакустической съемки плотные звукорассеивающие слои были обнаружены на частоте 200 кГц. На частоте 28 кГц ЗРС не регистрировались, либо находились на уровне шума. Очень низкие оценки силы цели для макрозоопланктона, предсказанные на частотах 120 и 38 кГц, -101 и -113 дБ соответственно (Greenlaw, 1977), означают, что даже при плотности биомассы зарегистрированной в сетных пробах до 123 мг/м³ MVBS близко к пороговым значениям гидроакустической системы.

В дневное время на глубинах от 0 до 300 м было зарегистрировано два плотных ЗРС: от 0 до 80 и от 80 до 250 м, соответственно (Рис. 3А). Верхний слой характеризовался значениями MVBS от -72,47 до -54,06 дБ (среднее значение -61,11 дБ), что соответствовало плотности биомассы от 1,17 до 73,65 мг/м³ (среднее значение 15,09 мг/м³). Более плотный нижний слой характеризовался значениями MVBS от -66,61 до -42,97 дБ (-58,19 дБ), что соответствовало плотности биомассы от 4,38 до 891,65 мг/м³ (29,10 мг/м³). Контрольные ловы

показали, что ЗРС состояли в основном из макрогектопуса: верхний слой – из особей длиной 6-15 мм, а нижний – из молоди и самцов до 5 мм, а также самок длиной более 15 мм. Ранее гидроакустические наблюдения в Баргузинском заливе показали, что дневные скопления макрогектопуса зарегистрированы на глубинах от 70 до 120 м (Мельник и др., 1995), что по нашим данным соответствует нижнему слою ЗРС (Рис. 3, 4).

В ночное время максимальная глубина регистрации ЗРС достигала 250-300 м. Макрогектопус рассредоточивался от поверхности до глубин 200-250 м (Рис. 3Б). Плотность ЗРС была неравномерной с максимумом на глубине 10-30 м, об этом свидетельствовало увеличение значения MVBS от -69,56 до -46,64 дБ (-56,35 дБ), что соответствовало плотности биомассы от 2,26 до 390,66 мг/м³ (44,01 мг/м³). На глубинах 50-200 м MVBS соответствовал значе-

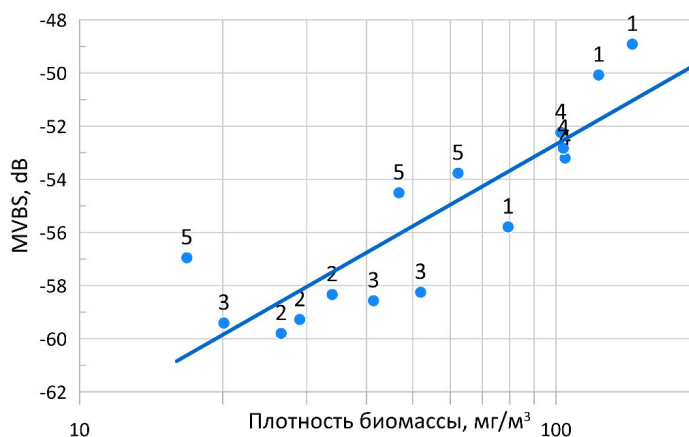


Рис.2. Соотношение MVBS и плотности биомассы макрогектопуса: 1-5 – станции.

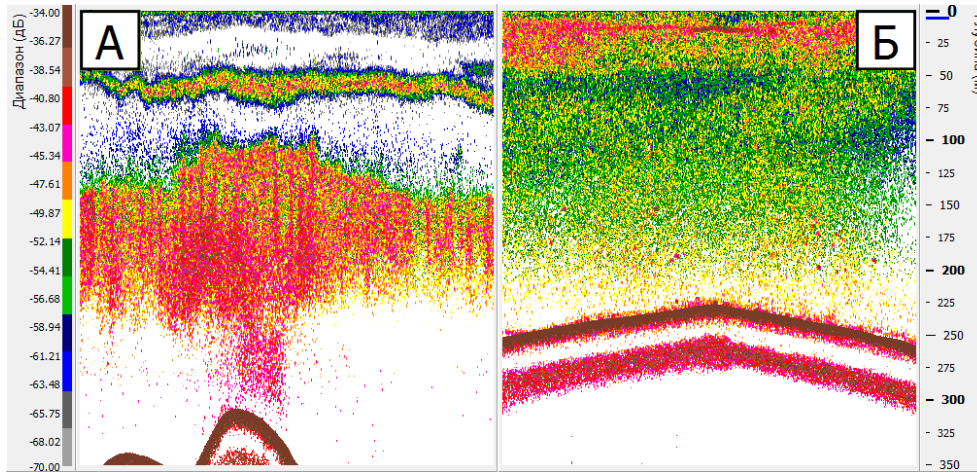


Рис.3. Эхограмма распределения ЗПС: днем (А) и ночью (Б).

ниям от -73,49 до -52,07 дБ (-64,89 дБ), что соответствует плотности биомассы от 0,93 до 115,22 мг/м³ (6,45 мг/м³). При приближении к берегу, глубина уменьшалась, что приводило к концентрации ЗПС и увеличению плотности до максимальных значений.

Полученные для каждой станции данные зондирования CTD показали, что температурный профиль был характерным для этого времени года (Рис. 4). Участок вертикального профиля на глубине 40-50 м с температурой воды 4,0-4,5 °С, можно охарактеризовать как зону термоклина в которой располагался зарегистрированный ЗРС. Мы предполагаем, что в этой зоне за резким снижением температуры, происходит увеличение плотности воды, которое воспринимается планктонными животными как «твердая» граница и способствует формированию ими плотных скоплений. Зарегистрированный на глубине 25-50 м ЗРС, находит свое отражения на вертикальных профилях хлорофилла-а и кислорода, в виде локальных максимумов (Рис. 4). В целом высокая концентрация кислорода в воде на всех глубинах со средним значением в диапазоне от 9 до 14,5 мг/л характерна для Байкала (Домышева и др., 2016).

Горизонтальное распределение ЗРС.

Полученное в нашей работе соотношение *MVBS* и плотности биомассы макрогектопуса $MVBS = -73,2 + 10,2 \cdot \text{Log}_{10} W$ ($r^2 = 0,75$), близко к регрессии, полученной ранее (Rudstam et al., 1992), $MVBS = -66,8 + 10,9 \cdot \text{Log}_{10} W$ ($r^2 = 0,72$), где *MVBS* – среднее объемное обратное рассеяние, *W* – плотность биомассы макрогектопуса в мг/м³. Различие коэффициентов регрессии можно объяснить различиями в полученной нами плотности биомассы макрогектопуса по сетным пробам. Среднее значение плотности биомассы макрогектопуса для дневных станций в нашей работе составляет 65,7 мг/м³, а в работе (Rudstam et al., 1992) – 169,5 мг/м³. Так же отличаются и максимальная плотность биомассы, в нашей работе она не превышала 123 мг/м³, тогда как в работе (Rudstam et al., 1992) присутствовали значения более 1200 мг/м³. Минимальные оценки плотности биомассы были сопоставимы и соответствовали значениям 10-20 мг/м³. В нашей работе размеры особей макрогектопуса в сетных пробах не

отличались от их размеров в работе L.G. Rudstam с соавторами (1992).

На основе полученного соотношения, по акустическим данным мы оценили распределение плотности биомассы в районе проведения гидроакустической съемки. Площадь обследованной акватории составила 67 км², что соответствует 16% от площади залива 415 км² глубже изобаты 50 м. Значения *MVBS* вдоль отдельных галсов были различны. Например, над большими глубинами, глубже 500 метровой изобаты, *MVBS* соответствовал значению -62,2 дБ, что в пересчете на плотность скопления макрогектопуса составило 12,3 мг/м³ (2,9 г/м²). На станциях с максимальными оценками *MVBS* и по результатам сетных ловов, регистрировались значения -48,9 дБ, что соответствует плотности скопления макрогектопуса 144 мг/м³ (34 г/м²), при этом средняя оценка *MVBS* для обследуемой площади составила -58,8 дБ, то есть 25,4 мг/м³ (5,9 г/м²). Следовательно, суммарная биомасса макрогектопуса на обследованной акватории составляет 0,39·10⁶ кг.

Распределение плотности биомассы по площади обследованной акватории не равномерно. Нужно отметить, что в основном скопления наблюдались вдоль изобат 300-100 м в восточной части (Рис. 5А), возможно это связано с влиянием вод р. Баргузин. В Баргузинском заливе система течений

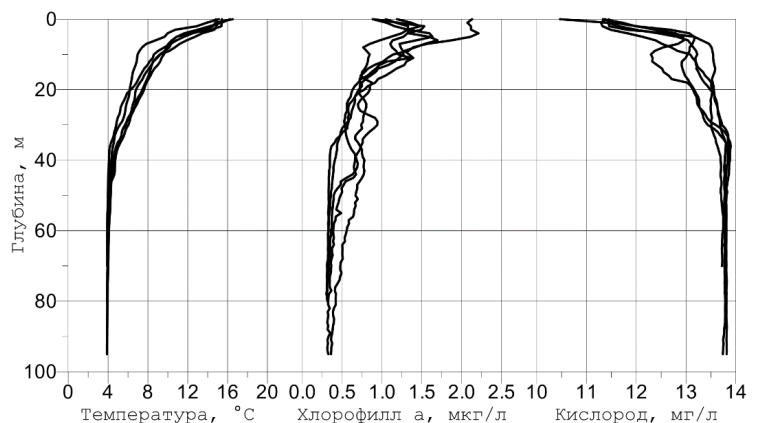


Рис.4. Вертикальные профили температуры, хлорофилла-а и растворенного кислорода.

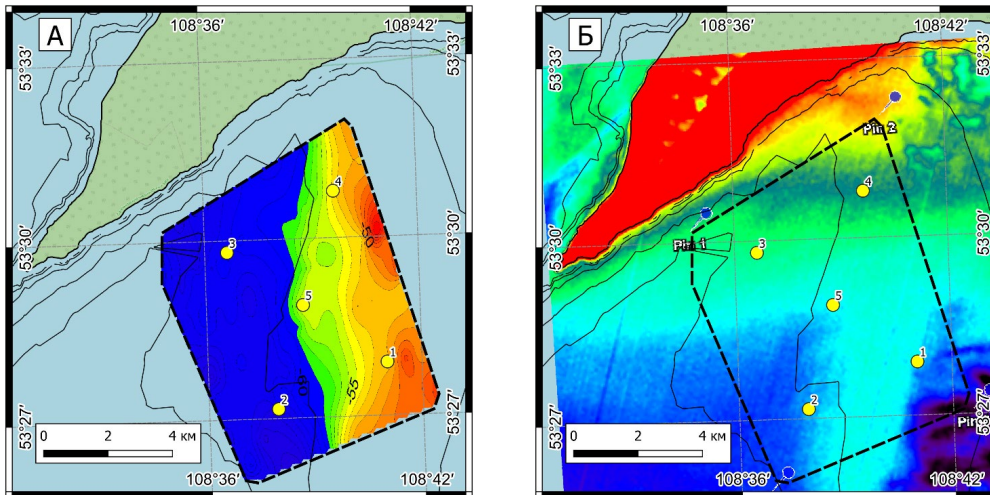


Рис.5. Карты распределения акустической плотности скоплений амфипод на глубине 0-250 м (А) и поверхностной температуры по данным MODIS (Б), изобаты указаны для глубин 50, 100, 200, 500 и 1000 м.

приводит к переносу вод реки от устья вдоль северного берега, то есть вдоль полуострова Святой нос (Сорокичкина и др., 2010). Однако на температурной карте (Рис. 5Б) и по данным STD зондирования (Рис. 4) влияния речных вод не прослеживалось.

Полученные данные позволяют оценить биомассу макрогектопуса для всего залива. Исходя из средней оценки плотности биомассы для обследованного полигона $25,4 \text{ мг/м}^3$ ($5,9 \text{ г/м}^2$), для всей акватории залива, глубже 50 м изобаты, общая биомасса макрогектопуса составляет $2,7 \cdot 10^6$ кг. В работе L.G. Rudstam с соавторами (1992) она оценена в $3,7 \cdot 10^6$ кг, что больше на 27% полученной нами. Различия объясняются более значимыми уловами в планктонных сетях, то есть фактически большими запасами макрогектопуса в 1988 и 1989 г. В работе М.Ю. Бекман и Э.Л. Афанасьевой (1977) приводится оценка общей биомассы макрогектопуса в $110 \cdot 10^6$ кг ($15,7 \text{ мг/м}^3$ или $3,7 \text{ г/м}^2$), для всего озера Байкал, площадь которого составляет 29746 км^2 глубже 50 м изобаты. Экстраполяция этих данных на площадь Баргузинского залива дает значение общей биомассы около $1,53 \cdot 10^6$ кг, что меньше оценки полученной в нашей работе. Таким образом, полученная нами оценка общей биомассы макрогектопуса, достоверна, а ее низкое значение свидетельствует о меньшей численности и биомассе макрогектопуса в Баргузинском заливе по сравнению с оценкой L.G. Rudstam с соавторами (1992), что требует дополнительных исследований.

4. Заключение

Макрогектопус является ключевым видом экосистемы озера, поэтому актуальные сведения о его численности и биомассе, а также о распределении и динамике необходимы для понимания экологических процессов, происходящих на Байкале в настоящее время. Получена зависимость силы среднего объемного обратного рассеяния и плотности макрогектопуса, на основе которой его биомасса в Баргузинском заливе оценена в $2,7 \cdot 10^6$ кг. Показано преимущество данного комплексного подхода, а также принципиальная возможность проведе-

ния площадной съемки распределения скоплений макрогектопуса по всей акватории озера Байкал, результаты которой, в перспективе, помогут скорректировать существующие оценки численности и биомассы этого вида.

Выполненные исследования показывают, что количественные оценки биомассы макрогектопуса в озере Байкал акустическим методом в совокупности с контрольными ловами планктонными сетями будут способствовать получению новых знаний об экологии животных. Кроме этого, они могут быть полезны при выяснении причин изменений в характере распределения байкальского омуля в районах традиционного промысла.

Благодарности

Работа выполнена в рамках тем государственного задания № 0279-2022-0004 (122012600083-9) и № 0279-2021-0005 (121032300224-8). Авторы выражают благодарность команде НИС «Г.Ю. Верещагин» за помощь в сборе материала.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Briseño-Avena C., Roberts P.L.D., Franks P.J.S. et al. 2015. ZOOPS- O2: A broadband echosounder with coordinated stereo optical imaging for observing plankton *in situ*. *Methods in Oceanography* 12: 36-54. DOI: [10.1016/j.mio.2015.07.001](https://doi.org/10.1016/j.mio.2015.07.001)
- Chacate O.E., Coetzee J.C., Axelsen B.E. 2024. Hydroacoustic classification and abundance estimation of mesopelagic fish in deep scattering layers (DSL) of the Indian Ocean. *ICES Journal of Marine Science* 0: 1-15. DOI: [10.1093/icesjms/fsae028](https://doi.org/10.1093/icesjms/fsae028)
- Dunn M.B., Pedersen G., Basedow S.L. et al. 2022. Inverse method applied to autonomous broadband hydroacoustic survey detects higher densities of zooplankton in near-surface aggregations than vessel-based net survey. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 80(3): 451-467. DOI: [10.1139/cjfas-2022-0105](https://doi.org/10.1139/cjfas-2022-0105)

- Føre M., Frank K., Norton T. et al. 2018. Precision fish farming: a new framework to improve production in aquaculture. *Biosystems Engineering* 173: 176-193. DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.10.014)
- Greenlaw C.F. 1977. Backscattering spectra of preserved zooplankton. *The Journal of the Acoustical Society of America* 62(1): 44-52. DOI: [10.1121/1.381503](https://doi.org/10.1121/1.381503)
- Hembre L.K., Megard R.O. 2003. Seasonal and diel patchiness of a *Daphnia* population: an acoustic analysis. *Limnology and Oceanography* 48: 2221-2233. DOI: [10.4319/lo.2003.48.6.2221](https://doi.org/10.4319/lo.2003.48.6.2221)
- Holbrook B.V., Hrabik T.R., Branstrator D.K. et al. 2006. Hydroacoustic estimation of zooplankton biomass at two shoal complexes in the Apostle Islands Region of Lake Superior. *Journal of Great Lakes Research* 32(4): 680-696. DOI: [10.3394/0380-1330\(2006\)32\[680:HEOZBA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.3394/0380-1330(2006)32[680:HEOZBA]2.0.CO;2)
- Karnaikhov D.Yu., Dolinskaya E.M., Biritskaya S.A. et al. 2021. New data regarding ecology of freshwater pelagic amphipod *Macrohectopus branickii* and other crustaceans of plankton from the southern part of Lake Baikal. *Acta Biologica Sibirica* 7: 39-48. DOI: [10.3897/abs.7.e65636](https://doi.org/10.3897/abs.7.e65636)
- Lertvilai P., Jaffe J.S. 2022. *In situ* size and motility measurement of aquatic invertebrates with an underwater stereoscopic camera system using tilted lenses. *Methods in Ecology and Evolution* 13: 1192-1200. DOI: [10.1111/2041-210X.13855](https://doi.org/10.1111/2041-210X.13855)
- Lertvilai P. 2020. The *in situ* plankton assemblage eXplorer (IPAX): an inexpensive underwater imaging system for zooplankton study. *Methods in Ecology and Evolution* 11: 1042-1048. DOI: [10.1111/2041-210X.13441](https://doi.org/10.1111/2041-210X.13441)
- Liu J., Tang Y. 2024. Monitoring two typical marine zooplankton species using acoustic methods in the South China Sea. *Sensors* 24: 4827. DOI: [10.3390/s24154827](https://doi.org/10.3390/s24154827)
- Makarov M.M., Muyakshin S.I., Kucher K.M. et al. 2020. A study of the gas seep Istok in the Selenga shoal using active acoustic, passive acoustic and optical methods. *Journal of Great Lakes Research* 46(1): 95-101. DOI: [10.1016/j.jglr.2019.10.014](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.014)
- Mallet D., Olivry M., Ighiouer S. et al. 2021. Nondestructive monitoring of soft bottom fish and habitats using a standardized, remote and unbaited 360° video sampling method. *Fishes* 6(4): 50. DOI: [10.3390/fishes6040050](https://doi.org/10.3390/fishes6040050)
- Megard R.O., Kuns M.M., Whiteside M.C. et al. 1997. Spatial distributions of zooplankton during coastal upwelling in western Lake Superior. *Limnology and Oceanography* 42: 827-840. DOI: [10.4319/lo.1997.42.5.0827](https://doi.org/10.4319/lo.1997.42.5.0827)
- Melnik N.G., Timoshkin O.A., Sideleva V.G. et al. 1993. Hydroacoustic measurement of the density of the Baikal macrozooplankton *Macrohectopus branickii*. *Limnology and Oceanography* 38(2): 425-434. DOI: [10.4319/lo.1993.38.2.0425](https://doi.org/10.4319/lo.1993.38.2.0425)
- Naumova E.Yu., Zaidykov I.Yu., Makarov M.M. 2020. Recent quantitative values of *Macrohectopus branickii* (Dyb.) (Amphipoda) from Lake Baikal. *Journal of Great Lakes Research* 46(1): 48-52. DOI: [10.1016/j.jglr.2019.10.002](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.002)
- Oh W.S., Park G.C., Choi J.H. et al. 2023. Density estimation of euphausiids and copepods by using a multi-frequency method. *Fisheries and Aquatic Science* 26(12): 689-697. DOI: [10.47853/FAS.2023.e61](https://doi.org/10.47853/FAS.2023.e61)
- Rudstam L.G., Melnik N.G., Timoshkin O.A. et al. 1992. Daily dynamics of an aggregation of *Macrohectopus branickii* (Dyb.) (Amphipoda, Gammaridae) in Barguzin Bay, Lake Baikal Russia. *Journal of Great Lakes Research* 18(2): 286-297. DOI: [10.1016/S0380-1330\(92\)71296-9](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(92)71296-9)
- Sato M., Benoit-Bird K.J. 2019. Biological-physical coupling in a highly adjective ecosystem: Through a lens of diel vertical migration. *The Journal of the Acoustical Society of America* 146 (4): 2898. DOI: [10.1121/1.5137056](https://doi.org/10.1121/1.5137056)
- Simrad A.S. 2003. Reference manual: Simrad EK60. Scientific echo sounder system.
- Watanabe Y.Y., Baranov E.A., Miyazaki N. 2020. Ultrahigh foraging rates of Baikal seals make tiny endemic amphipods profitable in Lake Baikal. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 117(49): 31242-31248. DOI: [10.1073/pnas.2014021117](https://doi.org/10.1073/pnas.2014021117)
- Бекман М.Ю., Афанасьева Э.Л. 1977. Распределение и продукция макрогектопуса. В: Бекман М.Ю. (Отв. ред.). Биологическая продуктивность пелагиали Байкала и ее изменчивость. Новосибирск: Наука.
- Дидоренко С.И., Ботвинкин А.Д., Тахтеев В.В. 2020. Новая трофическая связь в экосистеме Байкала: пелагические бокоплавцы *Macrohectopus branickii* (Crustacea, Amphipoda) и летучие мыши *Myotis petax* (Mammalia, Chiroptera). *Зоологический журнал* 99(10): 1140-1147. DOI: [10.31857/S0044513420100050](https://doi.org/10.31857/S0044513420100050)
- Домышева В.М., Пестунов Д.А., Сакирко М.В. и др. 2016. Углекислый газ, кислород и биогенные элементы в подледной воде литорали Южного Байкала (2004-2016 гг.). *Оптика атмосферы и океана* 12: 1073-1079. DOI: [10.15372/AOO20161211](https://doi.org/10.15372/AOO20161211)
- Карнаухов Д.Ю., Бирицкая С.А., Масленникова М.А. и др. 2019. Численность и структура популяции пелагической амфиподы *Macrohectopus branickii* в прибрежной зоне озера Байкал. *Acta Biologica Sibirica* 5(3): 154-158. DOI: [10.14258/abs.v5.i3.6574](https://doi.org/10.14258/abs.v5.i3.6574)
- Мельник Н.Г., Тимошкин О.А., Сиделева В.Г. 1995. Распределение *M. branickii* и некоторые особенности его экологии. В книге: Атлас и определитель пелагиобонтов Байкала с краткими очерками по их экологии. Новосибирск: Наука.
- Петров Е.А., Купчинский А.Б., Фиалков В.А. и др. 2021. Значение береговых лежбищ в жизни байкальской нерпы (*Pusa sibirica* Gmelin, 1788, Pinnipedia). 2. Поведение на лежбищах. *Зоологический журнал* 100(6): 671-685. DOI: [10.31857/S0044513421060106](https://doi.org/10.31857/S0044513421060106)
- Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 7 ноября 2017 г. N 435. 2017. «Об утверждении правил рыболовства для Байкальского рыбохозяйственного бассейна». URL: <http://base.garant.ru/70818098/> (дата обращения: 15.01.2020).
- Смирнов В.В., Смирнова-Залуми Н.С., Суханова Л.В. и др. 2015. О мерах по сохранению ресурсов байкальского омуля *Coregonus migratorius*. *Вестник рыбохозяйственной науки* 4: 42-45.
- Соколов А.В., Петерфельд В.А. 2018. О причинах введения запрета на промысловый лов омуля (*Coregonus autumnalis migratorius*, Georgi) озера Байкал в современный период. В: VI Международный Балтийский морской форум, С. 158-164.
- Сороковикова Л.М., Томберг И.В., Синюкович В.Н. и др. 2010. Особенности формирования зоны смешения речных и озерных вод в Баргузинском заливе Байкала. В: Пятая Верещагинская Байкальская конференция. Иркутск: Изд-во «Аспринт». С. 256-258.