

Assessment of the water quality of Lake Baikal and its tributaries in areas affected by local pollution based on microbiological and hydrochemical data

Original Article

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Martsinechko A.S., Chebykin E.P., Chebunina N.S., Zakharova Yu.R.*

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

ABSTRACT. The water quality of Lake Baikal and its tributaries, influenced by seven different local pollution sources, was assessed in the areas of wastewater discharge from wastewater treatment plants (WWTPs) of the towns of Slyudyanka, Baikalsk, and Severobaikalsk, as well as domestic wastewater discharge from tourist resorts and Maksimikha settlement, runoff of hot springs from thermal baths in Zmeinaya Bay, Baikal seal rookeries, and the tourist center on Tonky Island of the Ushkanyi Islands archipelago in September 2022. The waters of the lake and the Rivers Pokhabikha, Maksimikha, and Tyya using microbiological and hydrochemical analysis methods are assessed as clean II class quality (GOST 17.1.3.07-82), except for the coastal water zone opposite the mouth of the Pokhabikha River, where the water is defined as moderately polluted. The unequal distribution of the values of the self-purification coefficient indicates a high abundance of microflora of allochthonous origin and a low activity of autochthonous microorganisms involved in self-purification processes in the studied areas of the lake. It was found that wastewater discharged by treatment facilities; water at the mouth and surface water of the Baikal in the estuary of the Pohabikha River, water in thermal baths of hot springs in Zmeinaya Bay do not meet the requirements of SanPiN 1.2.3685-21 for the maximum permissible amount of generalized coliform bacteria, *Escherichia coli* and *Enterococcus*. At all control stations in the pelagic zone of Lake Baikal, remote from the studied local polluted sites, water quality indicators did not exceed the safety water standards for surface water bodies in terms of microbiological and hydrochemical parameters.

Keywords: Lake Baikal, water quality, organotrophic and psychrophilic bacteria, sanitary-microbiological parameters

For citation: Martsinechko A.S., Chebykin E.P., Chebunina N.S., Zakharova Yu.R. Assessment of the water quality of Lake Baikal and its tributaries in areas affected by local pollution based on microbiological and hydrochemical data // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 998-1019. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-998

1. Introduction

The waters of Lake Baikal are the object of I and II categories of water use (SanPiN 2.1.3684-21), i.e., they are used as a source of drinking, household water, and water supply for food industry enterprises, as well as for recreational purposes. However, negative changes are known to occur in localized areas of the littoral zone of the lake, such as mass growth of filamentous algae (Timoshkin et al., 2014; 2016), sponge mortality, increased concentrations of phosphates and nitrates, and organotrophic bacteria, including *E. coli* groups (Zemskaya et al., 2019). The reasons for the decrease in the quality of the coastal Baikal waters are increasing recreational impact and the discharge of untreated wastewater from the WWTPs of the settlements located

on the Lake Baikal shore (Drucker et al., 2023).

In recent years, regular microbiological studies have repeatedly revealed higher levels of sanitary-bacteriological parameters in Lake Baikal and its tributaries (Shtykova et al., 2016; Podlesnaya et al., 2022; Suslova et al., 2022; Malnik et al., 2019; 2022). The presented data of sanitary-bacteriological assessment of water quality cover in detail the coastal water zone of South and Middle Baikal (Malnik et al., 2019; Zemskaya et al., 2019), river mouths in the areas of local anthropogenic influence and pelagic stations of standard hydrological transects of the lake water area (Shtykova et al., 2019; Suslova et al., 2019; Drucker et al., 2023). The study of the possible continuous supply of sanitary-indicative bacteria and the preservation of their viability in Lake

*Corresponding author.

E-mail address: julia.zakharova@gmail.com (Y.R. Zakharova)

Received: June 28, 2024; **Accepted:** July 10, 2024;

Available online: August 30, 2024

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



Baikal, in combination with the determination of other groups of organotrophic microorganisms, is important for assessing the quality of the Baikal water (Elovskaya et al., 2022).

The aim of the work is to determine the number and distribution of microorganisms, including sanitary-indicative ones, and to assess the state of the Lake Baikal self-purification processes in the areas of influence of local pollution sources. In our work, we investigated from 6 to 13 points in each area connected with local pollution, including waste water discharge sites, river areas before and after waste water discharge, river mouths, the littoral zone at different distances from the shore, and the pelagic zone. This sampling scheme enabled to estimate the total number of microorganisms, cultured organotrophic psychrophilic and mesophilic bacteria, as well as to determine the sanitary-indicative bacteria and their distribution from the local pollution sites towards Lake Baikal.

2. Materials and methods

Study areas and sampling. On September 5-15, 2022, during the complex Circum-Baikal expedition we explored seven areas of the influence of anthropogenic and natural pollution sources on Lake Baikal: Slyudyanka town (Pokhabikha River, effluent from the WWTP); Baikalsk town (BPPM aerator pond, effluent from the WWTP); Maksimikha settlement (Barguzinsky Bay, tourist resorts), Tonky Island (Nerpa Centre), Tonky Island (seal rookery), Zmeinaya Bay (Chivyrkuisky Bay, hot springs), Severobaikalsk town (Tyya River, waste water from the WWTP) (Fig. 1). Sampling of effluent, river, and surface waters of the littoral zone at 2 m and 50 m from the shore, as well as of background areas of the lake pelagic zone at a distance of 3 km and more from pollution sources, was carried out according to the regulatory documents (GOST 31942-2012, MUK ECSD F 12.15.1-08, GOST 31861-2012). Water samples were collected from the surface water layer (0.5 m) in a pre-sterilized 1.5 L bottle from a boat in rivers, estuaries, and littoral zones of estuaries. Samples were also collected from the pelagic zone at depths of 0, 5, 10, 15, 20, and 25 m (integral sample 0–25 m) using the SBE32 Carousel Water Sampler from aboard the R/V “G.Y. Vereshchagin” (Table 1).

The total microbial abundance (TMA) was quantified by direct counting of preparations stained with DAPI (4,6-diamidino-2-phenylindole) (Porter and Feig, 1980) using an epifluorescence microscope (Axiovert 200 Zeiss, Germany).

Organotrophic bacteria were determined under different culturing conditions. Fish-peptone agar diluted 10-fold (FPA/10) was used to determine the abundance of autochthonous microflora native to a specific water body. The cultures were incubated at 22°C for 72 h (TMC, 22°C) (Gorbenko, 1961). The abundance of allochthonous microflora introduced into the water body as a result of anthropogenic pollution was determined on meat-peptone agar (MPA) after incubation at $37 \pm 1^\circ\text{C}$ for 24 h (TMC, 37°C). The self-cleaning coefficient (SC) was calculated as the ratio of the values of

the TMC index determined at temperatures of 22 °C and 37°C. The R2A medium was used for the cultivation of psychrophilic microorganisms (PM) at a temperature of 10 °C for 10 days.

Sanitary-microbiological parameters were determined according to SanPiN 1.2.3685-21. The total (generalized) coliform bacteria (TCB) and *E. coli* were determined using the membrane filtration method on Endo differential diagnostic medium. Similarly, the Enterococcus genus bacteria (EC) were identified on Enterococcus agar with azide medium. The analysis results were made according to GOST 24849-2014.

The physico-chemical parameters of water: pH, temperature (T), electrical conductivity (EC), concentrations of O_2 , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- were measured by standard methods according to Wetzel and Likens (2000), Manual for the chemical analysis of terrestrial surface water (2009) in an accredited laboratory for hydrochemistry and atmospheric chemistry, as described earlier (Malnik et al., 2019).

3. Results and discussion

3.1. Physico-chemical characterization of water in the study areas

In all study areas, water samples were collected in sunny, windless weather at air temperatures ranging from 10°C to 25°C. Water surface temperatures ranged from 6.4-10.1°C in the Pokhabikha, Maksimikha, and Tyya Rivers. In the direction from the river mouths from the coast to the background stations in the pelagic zone, the Baikal surface water was warmed up to $13.6 \pm 4.5^\circ\text{C}$ on average, except for the area opposite the mouth of the Pokhabikha River (6.5 - 7.5°C) and in the coastal water to the right from the mouth of the Tyya River (7.7°C). T of effluents sampled from WWTPs in Slyudyanka, Baikalsk, and Severobaikalsk towns was higher (14.2-19.8°C), while 42.8°C (Zm-1) and 39.3°C (Zm-1) were recorded in hot springs of Zmeinaya Bay (Zm-2). The pH values in all river and Baikal samples were found to vary within the slightly alkaline range from 7.63 to 8.67. In contrast, the samples from hot springs demonstrated alkaline values (9.6), while effluents from the wastewater treatment plant in Severobaikalsk town showed a slightly acidic medium (5.24). The maximum values of electrical conductivity (EC) were determined in effluents and hot springs (up to 864 $\mu\text{S}/\text{cm}$). In the water of the Pokhabikha and Maksimikha Rivers, the EC values (240 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and 156 $\mu\text{S}/\text{cm}$) were higher than the average in the Baikal water (127 $\mu\text{S}/\text{cm}$) and vice versa in the Tyya River water (98 $\mu\text{S}/\text{cm}$) less than in the Baikal water. Dissolved oxygen (O_2) concentrations in the river and lake water varied within a narrow range of 8.9-12.6 mg/dm³ (Table 1).

Contents of SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , NO_2^- and NH_4^+ in the effluents discharged by centralized and local water disposal systems of settlements or urban districts within the central ecological zone, as well as directly into Lake Baikal, are regulated in accordance with the order of the Ministry of Natural Resources of Russia from February 21, 2020 No. 83 and are classified as “moderately hazardous” harmful substances. The efflu-

Table 1. Description of the sampling site and physicochemical parameters of water in the study areas in September 2022

Station	Sampling site	T, °C	pH	EC, µS/cm	O ₂ ,	mg/dm ³					SO4 ²⁻
						NO2-1	NH4+	NO3-	PO43	NO2-1	
1-Riv100WW	Pokhabikha River (PR), 100 m above discharge of wastewater	6.4	8.27	220.6	11.8	0.030	1.700	0.011	0.046	10	
1-WW	wastewater discharge tube of the Slyudyanka town	14.2	7.47	863	НД	3.9	0.38	0.170	36	37	
1-Riv	mouth of PR	7.6	8.16	240.9	12.2	0.082	1.7	0.029	0.93	11	
1-1CW	2 m from the shore opposite mouth of PR	6.5	8.11	173.9	12.6	0.020	1.4	0.010	0.22	8.1	
1-50	50 m from the shore opposite mouth of PR	6.7	8.14	127.6	12.2	0.003	0.54	0.004	0.017	6.1	
1-3k	3 km from the shore opposite mouth of PR	7.5	7.95	123.8	НД	0.003	0.27	0.004	<0.013	6.0	
2-PAin	Pond-Aerator (PA) with wastewater from the Baikalsk city	17.5	7.5	279	НД	0.75	32.9	0.019	0.123	18	
2-PAout	PA, drain sump	15.8	7.1	266	НД	0.68	24.2	0.15	0.452	17	
2-1CW	2 m from the shore opposite PA	12.2	7.76	138.4	9.8	<0.003	0.92	<0.003	<0.013	8.0	
2-T	above the wastewater discharge tube from PA	12.2	8.28	123.7	11.1	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.5	
2-50	50 m from the shore opposite PA	12.2	8.31	123.7	10.0	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.6	
2-3k	3 km from the shore opposite PA	11.1	8.08	123.4	НД	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.1	
3-Rivup	Maksimicha River (MR), 780 m above mouth	10.1	7.96	155.7	10.6	0.030	0.25	0.004	<0.013	6.8	
3-Riv	mouth of MR	10.1	8.08	163.6	11.0	0.025	0.24	0.003	<0.013	10	
3-1 CWRiv	2 m from the shore opposite mouth of MR	14.2	8.07	132.5	9.5	0.006	<0.1	0.003	<0.013	7.1	
3-50Riv	50 m from the shore opposite mouth of MR	15.4	8.08	128.8	9.4	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.8	
3-3k	3 km from the shore opposite mouth of MR	15.1	7.63	128.5	НД	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.7	
3-12k	12 km from the shore opposite mouth of MR, exit from Barguzin Bay	13.6	7.92	126	НД	<0.003	<0.1	0.008	<0.013	6.3	
4-1CW	2 m from the shore opposite Nerpa Center (NC), Tonkiy Island	13.5	8.11	127.9	10.0	0.003	<0.1	0.006	0.028	6.3	
4-50	50 m from the shore opposite NC	13.7	8.06	126.2	11.5	<0.003	<0.1	0.003	<0.013	6.1	
4-50 CWL	270 m from station 4-1 CW	13.3	8.48	126.6	10.9	0.003	<0.1	0.003	<0.013	6.2	
4-50L	50 m from station 4-50 CWL	13.3	8.16	126.2	8.9	0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.4	
4-3k	3 km from the shore opposite NC	13.8	7.99	126.2	НД	0.005	<0.1	0.004	<0.013	6.3	
5-1CW	2 m from the shore opposite seal rookery (SR), Tonkiy Island	12.8	8.41	126.1	10.5	0.006	<0.1	0.003	<0.013	5.6	
5-50	50 m from station 5-1 CW opposite SR	13.5	8.47	126.3	10.6	0.003	<0.1	<0.003	<0.013	5.6	
5-3k	3 km from the shore opposite SR	13.2	7.99	124	НД	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	5.6	
Zm-1	hot spring 1 (HS1), Zmeinaya Bay	48.2	9.54	571	НД	<0.003	0.15	0.006	0.62	121	
Zm-2	hot spring 2 (HS2), Zmeinaya Bay	39.3	9.63	864	НД	<0.003	0.10	0.006	0.68	166	
6-1CW	2 m from the shore opposite HS1	15.6	8.24	141.2	9.0	0.008	<0.1	<0.003	<0.013	15	

Station	Sampling site	T, °C	pH	EC, µS/cm	O ₂ ,	mg/dm ³						SO ₄ ²⁻
						PO ₄	NO ₃	NO ₂ -1	NH ₄ ⁺	NO ₂ -1	NO ₃	
6-50	50 m from the shore opposite HSI	14.3	8.3	130.7	9.5	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	<0.013	<0.013	6.8
6-3k	3 km from the shore opposite HSI	14.9	8.04	126.3	НД	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	<0.013	<0.013	6.0
6-16.4k	16 km from the shore opposite HSI, exit Chivirkuisii Bay	14.6	8.08	126.5	НД	<0.003	<0.1	0.010	<0.013	<0.013	<0.013	6.0
7-Riv130LA	Tyya River (TR), left branch, 130 m above discharge of wastewater	6.5	7.61	97.5	11.4	<0.003	0.56	<0.003	<0.013	<0.013	<0.013	9.6
7-Riv100RA	TR, right branch, 120 m above discharge of wastewater from Severobaikalsk	6.5	7.75	97.5	11.5	<0.003	0.55	<0.003	<0.013	<0.013	<0.013	9.7
7-WW	wastewater discharge tube	19.8	5.24	699	НД	5.9	157	0.017	2.9	0.017	2.9	34
7-Riv	650 m above of the mouth TR	6.5	7.7	97.5	12.2	0.011	0.79	0.004	<0.013	<0.013	<0.013	9.7
7-260 CWL	2 m from the shore, 260 m to the left of the mouth TR	12.3	8.04	124.4	10.1	<0.003	<0.1	0.005	<0.013	<0.013	<0.013	6.9
7-540 CWR	2 m from the shore, 540 m to the right of the mouth TR	7.7	7.68	96	11.1	<0.003	0.46	<0.003	<0.013	<0.013	<0.013	9.2
7-200	200 m from the shore opposite mouth of TR	12.5	8.14	122.1	10.3	<0.003	<0.1	0.014	<0.013	<0.013	<0.013	6.8
7-6.5k CWL	2 m from the shore, 6.5 km to the left of the mouth TR	13.4	8.67	124.2	10.4	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	<0.013	<0.013	6.6
7-3k	3 km from the shore opposite mouth of TR	НД	8.15	125.4	НД	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	<0.013	<0.013	6.4
7-Nep CW	2 m from the shore, 1,5 km to the left of the mouth TR, boat station	НД	8.05	148.7	9.0	<0.003	0.23	0.006	<0.013	<0.013	<0.013	7.9

Note: values exceeding the standards for the content of harmful substances in wastewater discharged (1) directly on Lake Baikal, (2) by centralized and local sources of wastewater disposal of settlements or traditional districts within the central zone of the zone according to the order of the Ministry of Natural Resources of Russia dated February 21, 2020 No. 83: permissible content SO₄²⁻ (1)5.53 and (2) + 50.0 mg/dm³, PO₄³⁻(phosphorus) (1)0.01 and (2)0.1 mgP/dm³, NO₃⁻ (1)0.57 and (2)9 mg/dm³, NO₂⁻ (1)0.001 and (2)0.2 mg/dm³, NH₄⁺ (1)0.01 and (2)0.4 mg/dm³

Table 2. Abundance of bacteria and sanitary-microbiological indicators in surface water samples in September 2022

Station	TMA × 10 ⁶ cells/mL	PM	TMC 22 °C	TMC 37 °C	SCC	TCB	EC	E. coli
		CFU/cm ³				CFU/100 cm ³		
1Riv100WW	3.2	680	324	52	6.23	268	100	0
1WW	27.6	НД	2208	29024	-	3500	84200	3500
1Riv	1.1	2908	1992	5848	0.34	1350	1650	1350
1-1CW	1.0	2856	1360	790	1.72	976	332	976
1-50	2.1	586	368	6	61.33	83	39	0
1-3k	1.4	25	32	0	32	9	0	0
2PAin	3.7	НД	1146	1400	-	12500	300	0
2PAout	6.3	НД	1258	1070	-	7300	200	0
2-1CW	0.4	103	76	4	19	192	0	0
2T	1.5	18	8	0	8	110	0	0
2-50	1.8	8	13	0	13	65	0	0
2-3k	0.6	5	8	0	8	17	0	0
3-Rivup	НД	НД	1448	58	24.96	64	52	64
3-Riv	0.5	НД	98	2	49	140	0	0
3-1CWRiv	0.6	800	1112	43	25.86	34	0	34
3-50 Riv	0.6	166	808	60	13.46	21	1	0
3-3k	1.0	867	1408	4	352	13	0	0
3-12k	0.7	580	302	114	2.64	78	5	0
4-1CW	0.7	64	55	7	7.85	39	2	0
4-50 CWL	НД	НД	13	7	1.85	100	0	0
4-50	0.7	15	15	5	3	78	0	78
4-50L	НД	НД	5	0	5	108	0	0
4-3k	0.8	7	32	3	10.66	40	0	0
5-1CW	0.6	47	152	21	7.23	86	0	0
5-50	0.6	109	262	118	2.22	12	6	0
5-3k	1.8	42	156	66	2.36	4	0	0
Zm1	0.8	НД	302	127	-	1860	0	1860
Zm2	0.3	НД	2032	114	-	5240	60	5240
6-1CW	1.3	548	792	507	1.56	7	68	7
6-50	0.7	109	248	122	2.03	6	6	6
6-3k	3.0	181	608	240	2.53	17	0	0
6-16.4k	2.4	22	107	38	2.81	1	0	0
7-Riv130LA	0.1	НД	52	7	7.42	24	5	24
7-Riv100RA	0.2	НД	13	2	6.5	37	1	0
7-WW	5.6	НД	51	154	-	4700	0	0
7-Riv	0.3	НД	42	5	8.4	120	0	0
7-260 CWL	0.7	78	456	31	14.70	0	7	0
7-540 CWR	0.4	247	200	7	28.57	0	35	0
7-200	3.6	9	70	1	70	106	2	0
7-6.5kCWL	НД	НД	98	5	19.6	436	1	0
7-3k	1.5	22	92	30	3.06	0	0	0
7-NepCW	1.3	164	285	54	5.27	20	128	0

Note: values that exceed the standards SanPiN 1.2.3685-21 are highlighted, TBA - total bacterial abundance, PM - psychrophilic microorganisms, TMC - total microbial count, EC – Enterococcus, TCB - total (generalized) coliform bacteria, SCC - self-cleaning coefficient, dash – no data available.

Site 1. TMA (3.2×10^6 cells/mL) was the highest, above the discharge of treated effluents (1-Riv100WW) into the Pokhabikha River among all samples from the Slyudyanka area, and the TMA/TMC 22°C ratio was more than 103, which classifies water according to GOST 17.1.3.07-82 as Class II clean water. The TMA/TMC 22°C ratio usually serves to assess the sanitary condition of water bodies and characterizes the trophic status of the biocoenosis. The value of this ratio in waters rich in labile organic matter is 10^3 – 10^2 in moderately polluted waters of class III and less than 10^2 in polluted waters of class IV, V, and VI, whereas in clean water bodies and watercourses of class II it is more than 103 (GOST 17.1.3.07-82). In this case, the self-cleansing coefficient (SC) at the station 1-Riv100WW was 6.23, which corresponds to a completed self-cleansing process with a SC equal to or greater than 4 (MUK 4.2.1884-04). The ratio of quantitative indicators reflecting the total content of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms in 1 ml of tested water (TMC, determined at temperatures of 22 °C and 37 °C, is expressed in the SC, with the help of which it is possible to evaluate the activity and state of self-purification processes of natural water bodies (MUK 4.2.1884-04). In the areas of the domestic effluents pollution, the quantitative values of both groups are similar. The indicator provides additional information on sanitary condition of the water bodies, sources of pollution, and self-purification processes.

In treated effluents from the Slyudyanka WWTP, the TMA was 27.6×10^6 cells/mL, and the TMC 22 °C and TMC 37 °C values were the highest (2208 CFU/cm³ and 29024 CFU/cm³) of all the samples tested. The influence of effluents was significantly evident at the mouth of River 1-Riv and in the Baikal estuarine water at 2 m from the shore of 1-1CW. According to the TMA/TMC ratio of 22°C (10^2), the water here belongs to the quality category III and is assessed as moderately polluted. Considering the fact that the abundance of allochthonous microflora (TCM 37°C) introduced into the water body was high, the SC values at these stations were low (0.34 and 1.72), indicating a high anthropogenic load. At the same time, when assessing all indicators of microflora abundance at the stations in the littoral zone at a distance of 50 m from the shore (1-50) and control background in the pelagic zone at a distance of 3 km from the coast (1-3k), the water corresponded to the II quality class, and the high SC indicated active processes of self-purification in the lake.

In the area of influence of Slyudyanka town, exceedances of sanitary-microbiological parameters were detected in treated effluents (1-WW), at the mouth of the Pokhabikha River (1-Riv), and in the coastal water of the lake (1-1CW) (Table 2). The study identified the main indicators used to assess the safety of water bodies according to San PiN 1.2.3685-21: generalized coliform bacteria (TCB), *Escherichia coli* (*E. coli*), and enterococci (EC). The recorded high TCB values at the stations 1-WW (3500 CFU/100 cm³), 1-Riv (1350 CFU/100 cm³), and 1-1CW (976 CFU/100 cm³) were 7, 2.7, and 1.9 times higher than the normative values, respectively. The TCB values decreased with

increasing distance from the treated effluent discharge site and did not exceed standards at the stations 1-50 and 1-3k. The recently introduced indicator, effective from 1 January 2022 (SanPin 1.2.3685-21), is the “Generalized coliform bacteria” (TCB) indicator, which replaces the previous indicator for total coliform bacteria. The abbreviation and units of measurement remain the same. The new indicator takes into account not only lactose-positive *Enterobacteriaceae* but also other atypical lactose-negative colonies that produce fermentation of D-glucose to acid and gas formation (Zagainova et al., 2020). The use of this indicator is related to the fact that with increasing anthropogenic load on water bodies, warming of the microclimate, changes in human food behavior, introduction of imported food products, and uncontrolled use of antibiotics, some phenotypic properties of *Enterobacteriaceae*, metallic shine of colonies, and ability to ferment lactose have started to be lost (Trukhina et al., 2022). The determination of two biochemical traits allows for the detection of bacteria belonging to the *Enterobacteriaceae* family, thereby ensuring that their presence is within the permissible limits (not more than 500 CFU/100 cm³).

The indices of *E. coli* at the stations 1-WW, 1-Riv, and 1-1CW were 35, 13.5, and 9.7 times higher than the maximum permissible limits, respectively, while they were not detected at the stations 1-50 and 1-3k. For sanitary-microbiological control of water reservoirs, the indicator “Thermotolerant coliform bacteria” is replaced by the indicator “*E. coli*,” which provides better detection of fresh fecal contamination in water reservoirs (SanPin 1.2.3685-21). This is caused by the fact that *Escherichia coli* are able to grow at both 37°C and 44°C and are prevalent in human and animal feces compared to other representatives of thermotolerant coliforms (Zagainova et al., 2020, Trukhina et al., 2022). The indicator of *E. coli* is proposed for all types of surface water bodies and is normalized to no more than 100 CFU/100 cm³. The *Enterococci* (EC) numbers were also found to be significantly higher than the permissible limits at the following locations: station 1-Riv100WW (10-fold, 100 CFU/100 cm³), 1-WW (842-fold, 84200 CFU/100 cm³), 1-Riv (165-fold, 1650 CFU/100 cm³), 1-1CW (33.2-fold, 332 CFU/100 cm³), and 1-50 (3.9-fold, 39 CFU/100 cm³). Although the abundance of enterococci decreased with distance from the discharge site, the undoubtedly very high levels of these microorganisms indicate the presence of fresh fecal pollution and an unfavorable epidemiological situation in the whole study area, with the exception of the pelagic background station. Enterococci are permanent inhabitants of human and animal intestines and are excreted in large quantities into the external environment. Norms for surface water sources and effluents in the places of discharge into water bodies are defined as no more than 100 CFU/100 cm³, in recreational areas, no more than 10 CFU/100 cm³. The typical morphological and physiological features of enterococci that contribute to their resistance to environmental factors and disinfectants in water treatment were previously demonstrated in studies of representatives of this group isolated from Lake Baikal (Kravchenko, 2009).

Microbiological research in 2021-2023 in the area of wastewater discharge from the Slyudyanka WWTP showed that river water and coastal water areas are under the influence of wastewater and surface runoff, which is characterised by a high percentage of samples that do not meet sanitary-bacteriological requirements (Suslova et al., 2022; Drucker et al., 2023). Analysis of these data indicates inefficient operation of the WWTP, resulting in the release of insufficiently treated wastewater into the natural watercourse and the potential epidemiological danger of water in recreational areas.

Site 2. TCM at the littoral and pelagic stations of the lake in the area opposite the effluents discharge from the aeration pond, which is the final stage of the Baikalsk WWTP, varied within $0.4-1.8 \times 10^6$ cells/mL. The TMA/TCM ratio of 22°C was more than 10^3 and the SC was more than 4, which classified the water at all the studied stations as clean water. The treated effluents of the aeration pond exhibited high TMA values of water in the inflow water (2-PAin) of 3.6×10^6 CFU/ml and in the outflow (2-PAout) of 6.3×10^6 CFU/ml. The TCM values of water at 22 °C and 37°C in the inflow and outflow of the aeration ponds were also high, at 1146 CFU/cm³ and 1258 CFU/cm³, respectively, and 1400 CFU/cm³ and 1040 CFU/cm³, respectively. The sanitary-microbiological parameters in effluents exceeded permissible norms: TCB by 25 and 14.6 times, and EC by 3 and 2 times, respectively. The coastal water area opposite the aeration ponds and the pelagic background station showed TCBs within the permissible limits, with a decrease in abundance from 192 CFU/100 cm³ at the shore to 17 CFU/100 cm³ at a distance of 100 meters. *E. coli* was not found in any sample from the area. Our study didn't find any exceedances of sanitary-microbiological parameters in the Baikal water, including the station located above the effluent discharge pipe (2-T) into the lake. However, high values of TCB and EC indicators, determined by us in the effluents of the pond-aerator, as well as those detected earlier in the surface water of the coastal zone of Baikalsk town during sanitary-bacteriological monitoring in 2010-2023 (Drucker et al., 2023), indicate low efficiency of effluent treatment.

Site 3. TMA at the stations of the littoral zone of Barguzinsky Bay and the pelagic zone of the lake opposite to the area of tourist bases near Maksimikha settlement varied within $0.5-1.0 \times 10^6$ cells/mL. The TMA/TCM ratio of 22°C at the stations 3-Riv and 3-12k was more than 10^3 , which classifies the water as clean, while at stations 3-1CW Riv. 3-50 and 3-3k, was between 10^3-10^2 and classifies the water as moderately polluted. The self-purification coefficient at all stations is above 4, indicating a high potential for natural self-purification. However, at the outflow from Barguzinsky Bay (3-12k), the SC was 2.64, indicating that the self-purification process in this water area of the lake is not yet complete. Sanitary-microbiological parameters did not exceed the normative values at all stations studied, except for water in the Maksimikha River sampled at 780 m above the mouth (3-Rivup), where EC values exceeded the norm by 5.2 times (52 CFU/100 cm³). The excessive EC indicator shows the fact of recent

fecal pollution of the river water, which occurs probably when fecal effluents from residential houses in the settlement or during the grazing of livestock get into the water. As it is known, there are more than a dozen recreation centers and guest houses along the Baikal shore near Maksimikha settlement. At the same time, domestic and fecal water is discharged without controlled treatment into the coastal territory. According to Drucker et al. (2023), samples of the coastal sandy sediments were found to be contaminated with bacteria that indicate a potential risk to public health. This contamination level was sufficient to classify the samples as epidemiologically dangerous.

Sites 4 and 5. Tonky Island is one of the smaller islands of the Ushkanyi Islands archipelago, where the ecological trail "To the Baikal seal rookery" is located, and excursions are regularly organized during the summer tourist season. To assess the anthropogenic impact on water quality in the coastal and pelagic zones, samples were taken from the eastern side of the island, where the Nerpa information center is located and where ships stop to disembark tourists (Site 4, Fig.). To assess the impact of the Baikal seal activity on the water quality, samples were taken from the western side of the island where the seal rookery is located (Site 5, Fig.). The maximum TMA values (1.8×10^6 cells/mL) were recorded at the station 5-3k, with the remaining samples ranging from 0.6×10^6 c/ml to 0.8×10^6 cells/mL. The TMA/TCM ratio in all studied samples was more than 10^3 and evaluated the water as clean (quality class I-II). However, at several stations it was found that the numerical values of 22°C TMC and 37°C TMC were similar and consequently had low SC values: 4-50 CWL - 1.85, 4-50 - 3, 5-50-2.22, 5-3k-2.36. The presence of allochthonous microorganisms in number close to the number of microorganisms of autochthonous origin is indicative of an increased local input of introduced bacteria into the water and a reduced activity of bacteria naturally inhabiting the lake. Furthermore, no exceedances of sanitary-indicative bacteria were identified, which indicates that tourist activity has not influenced the epidemiological situation in the area of Tonky Island.

Site 6. In the coastal waters of Zmeinaya Bay and the pelagic zone of Chivyrkuisky Bay, the highest TMA values were recorded at the stations 6-1CW (1.3×10^6 c/ml), 6-3k (3.0×10^6 cells/mL), and 6-16.4k (2.4×10^6 cells/mL), and the TMA/TMC 22°C ratio was more than 10^3 . The SC was below 4 (1.56 - 2.81) at all stations studied, indicating incomplete self-purification processes and local water pollution due to the heavy tourist load in this part of the bay. High levels of TCB (1860 CFU/100 cm³ and 5240 CFU/100 cm³) were found in places where people bathed in thermal baths of hot springs (Zm-1 and Zm-2), which exceeded the permissible standards by 3.72 and 10.48 times, respectively. Also, *E. coli* was found in both thermal baths and exceeded the normative values by 18.6 (Zm-1) and 52.4 (Zm-2) times, and EC by 6 times in Zm-2. In the coastal water (6-1CW) opposite the hot spring (Zm-2), an excess of enterococci of 6.8 times was observed. At a distance of 50 m from the shore (6-50), 3 km (6-3k)

and at the outflow of Chivyrkuisky Bay (6-16.4k), sanitary-indicative bacteria were detected in insignificant amounts or were absent.

Exceedances of permissible values of sanitary-microbiological parameters according to SanPiN 1.2.3685-21 in thermal baths, runoff streams, and at the water's edge at a distance of up to 5 meters were also detected earlier (Suslova et al., 2022, Elovskaya et al., 2022). Obviously, the number of bathers does not correspond to the rate of water renewal in the baths, while the temperature of hot spring water creates favorable conditions for the development of opportunistic coliform bacteria. Given the fact that hot springs are objects of permanent recreational visit, it is necessary to inform tourists about safety measures when bathing.

Site 7. TMA in the left (7-Riv130LA) and right (7-Riv100RA) branches of the Tyya River above the effluents discharge from the Severobaikalsk WWTP was minimal and amounted to 0.1×10^6 cells/mL and 0.2×10^6 cells/mL. River water above the WWTP discharge belongs to the pure I-II class of quality with a TMA/TMC ratio at 22°C greater than 10^3 and a SC above 4. In treated effluents from Severobaikalsk (7-WW) WWTP, the TMA was maximum at 5.6×10^6 cells/mL. In the mouth of the Tyya River (7-Riv), in coastal water from the mouth (7-260CWL, 7-540CWR, 7-200, 7-NepCW), and in the pelagic zone (7-3k), the TMA ranged from 0.3×10^6 c/ml to 3.6×10^6 cells/mL. At the stations in the estuary, water quality corresponded to clean water in which autochthonous microflora dominated over allochthonous microflora and self-purification processes were active. The SC here was high and ranged from 8.4 to 70, but at the station 7-3k, it was less than 4, indicating low activity of the natural microbial population in the pelagic zone of this area. In 7-WW, the number of *E. coli* was 4700 CFU/100 cm³, which was 9.4 times higher than the normative values; in the other samples of the study area, *E. coli* were found in the amount acceptable by normative documentation or were absent. No *E. coli* representatives were found in any of the samples, except for 7-Riv130LA, in which the number (24 CFU/100 cm³) did not exceed the permissible value. EC excess was recorded in coastal water to the right of the river mouth (7-540 CWR) by 3.5 times, and in Neptun Bay (7-NepCW) by 12.8 times. At the other stations, the amount of EC was within the permissible values.

High levels of TCB in 7-WW indicate a potential risk of *Enterobacteriaceae* contamination of the watercourses of the Tyya River, into which inadequately treated effluent from the Severobaikalsk WWTP is discharged. Lactose-positive *Enterobacteriaceae* of fecal origin from the family *Enterobacteriaceae* of the genera *Escherichia*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Klebsiella*, the most frequently isolated from environmental objects, are usually etiologically associated with the intestinal infections reported at that time (Trukhina et al., 2022). Non-compliance with the requirements of SanPiN 1.2.3685-21 and exceedance of sanitary-microbiological parameters in waste water and surface water of the mouth water area of the Tyya River were also revealed earlier during microbiological monitoring (Shtykova et al., 2016, Drucker et al., 2023).

3.3. Distribution of psychrophilic microorganisms

The abundance of culturable psychrophilic microorganisms (PM) was assessed at 28 stations in the study areas. The highest values were recorded at the Site 1 in the river water and surface water of the littoral estuary water zone (from 586 CFU/cm³ to 2908 CFU/cm³). In general, the number of PMs exceeded that of organotrophic bacteria grown on RPA/10 at 22°C (TMC 22°C) by approximately twofold, with comparable numbers observed in the pelagic zone (1-3k). In the rest of the studied areas, PMs were higher at littoral zone (47-800 CFU/cm³) than in the pelagic zone (5-22 CFU/cm³), with the exception of 3-3k and 3-12k (867 CFU/cm³ and 580 CFU/cm³). It should also be noted that in the surface water of the estuarine and pelagic zones, the number of PM significantly exceeded the number of mesophilic bacteria (TMC 37°C). Site 6 shows the dominance of mesophiles, which may be related to the favorable temperature regime for the development of this group of microorganisms, which arises due to water runoff from hot springs and warming of the shallow zone of Chivyrkuisky Bay.

Lake Baikal is a habitat for cold-loving microorganisms, which are mostly represented by psychrotolerant forms with a growth optimum of 22°C (Namsaraev et al., 2008; Martsinechko and Zakharova, 2023). Culturable psychrophiles were isolated from water, endemic sponge species, and bottom sediments from different areas of Lake Baikal, and their high abundance and enzymatic activity were shown (Parfenova et al., 2008; 2009; Babich et al., 2021, Martsinechko and Zakharova, 2022). The microbial community of the lake plays a key role in water quality formation, self-purification of the water body, degradation of organic matter, and maintaining the natural chemical status of the aquatic environment (Tulokhonov, 2009). In our study, in samples collected in the area of effluent discharge in the Slyudyanka WWTP, cultivated PMs dominate in the organotrophic community. Thus, PMs are numerous natural microorganisms of a natural water body and can be active participants in the self-purification processes of a water body, which should be taken into account when assessing water quality.

4. Conclusion

The water quality of seven areas of Lake Baikal was assessed in September 2022. The results showed that the ratio of TMA/TMC 22°C, which is used to assess the sanitary condition of water bodies, was more than 10^3 . According to GOST 17.1.3.07-82, this classification defines the water as a clean water body of class II. The exceptions were water samples taken at the mouth of the Pokhabikha River and in the Baikal water at the mouth water area at a distance of 2 m from the shore, where the water was classified as moderately polluted according to the TMA/TMC 22°C ratio (10^2). The excess of natural microorganisms, including psychrotolerant ones, over the number of introduced bacteria at the stations of the Tyya mouths and Maksimikha rivers, the coastal water area of Baikalsk, Maksimikha,

Severobaikalsk, and most pelagic stations indicates the activity of autochthonous microflora. Low self-purification coefficient determined at the stations in the water area of the Pokhabikha River mouth, Tonky Island, Zmeinaya Bay indicates a high load of microflora of allochthonous origin and low intensity of self-purification in these parts of the lake.

A review of effluents discharged by the WWTP of Slyudyanka and Severobaikalsk towns into the surface watercourses, the mouth of the Baikal coast, and the thermal baths of hot springs of Zmeinaya bay revealed that the levels of generalized coliform bacteria, *Escherichia coli*, and *Enterococcus* do not meet the requirements of SanPiN 1.2.3685-21. Exceedance of normative requirements for enterococci in the river water near Maksimikha settlement, coastal water of Zmeinaya Bay in Chivyrkuisky Bay and Neptun Bay near Severobaikalsk was recorded. At the littoral stations located 50 m from the shore and background stations in the pelagic zone of Lake Baikal at a distance of 3 km or more from the investigated local pollution sites, water quality indicators did not exceed surface water safety standards for microbiological and hydrochemical parameters.

Acknowledgements

We are grateful to Suslova M. Yu, responsible for the accredited laboratory of aquatic microbiology (LIN SB RAS), for valuable consultations and assistance in the preparation of sanitary-microbiological research. The study was carried out within the State Assignment No. 0279-2021-0008 (121032300186-9)

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Babich O., Shevchenko M., Ivanova S. et al. 2021. Antimicrobial potential of microorganisms isolated from the bottom sediments of lake Baikal. *Antibiotics* 10 (8): 927. DOI: [10.3390/antibiotics10080927](https://doi.org/10.3390/antibiotics10080927)
- Drucker V.V., Suslova M.Yu., Nebesnykh Yu.R. et al. 2023. Sanitary-bacteriological monitoring of water quality in Lake Baikal – from single/one-off studies to systematic annual expeditions. *Limnology and Freshwater Biology* 6 (6): 164-179. DOI: [10.31951/2658-3518-2023-A-6-164](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-A-6-164)
- Elovskaya I.S., Chernitsyna S.M., Pavlova O.N. et al. 2022. Sanitary-microbiological characteristics of water in the area of the Zmeinaya thermal spring (Northern Baikal, Russia, 2022). *Limnology and Freshwater Biology* 6 (5): 145-155. DOI: [10.31951/2658-3518-2023-A-5-145](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-A-5-145)
- Horbenko Yu.A. 1961. On the most favourable amount of “dry nutrient agar” in media for culturing marine heterotrophic microorganisms. *Microbiology* 30 (1): 168-172.
- GOST 17.1.3.07-82. 1982. Ochrana prirody. Hydrosphere. Pravila kontrolya kachestva vodi vodoyomov i vodotokov. [Nature protection. Hydrosphere. Procedures for quality control of water in reservoirs and stream flows] (in Russian) URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012472>
- GOST 31942-2012. 2012. Voda pit'yevaya. Otbor prob dlya mikrobiologicheskogo analiza [Drinking water. Sampling for microbiological analysis]. (in Russian) URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097811>
- GOST 24849-2014. 2014. Voda. Metody sanitarno-bakteriologicheskogo analiza dlya polevykh usloviy [Water. Methods of sanitary-bacteriological analysis for field conditions]. (in Russian) URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200115427/>
- GOST 31861-2012. 2012. Voda. Obshchie trebovaniya k otboru prob. [Water. General requirements for sampling]. (in Russian) URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097520>
- Kravchenko O.S. 2009. Bacteria of the genus *Enterococcus* in Lake Baikal: distribution, species composition, adaptation mechanism. Author's thesis. Cand. (Biology). Ulan-Ude, Russia.
- Malnik V.V., Timoshkin O.A., Suturin A.N. et al. 2019. Anthropogenic changes in hydrochemical and sanitary-microbiological parameters of water quality in tributaries of South Baikal (Listvenichny Bay). *Water resources* 46 (5): 533-543.
- Malnik V.B., Suturin A.H., Gorshkova A.S. et al. 2022. Water quality of the shallow zone of Lake Baikal by sanitary-microbiological parameters. *Geography and natural resources*. 43 (2): 84-93. DOI: [10.15372/GIPR20220209](https://doi.org/10.15372/GIPR20220209)
- Martsinechko A.S., Zakharova Yu.R. 2022. Vertical distribution of psychrophilic and mesophilic microorganisms in the water column of Lake Baikal. Collection of theses from the joint scientific-practical conference of students on “Biotechnology in our life – 2022”: 17-19.
- Martsinechko A.S., Zakharova Yu.R. 2023. Psychrophilic microorganisms in lakes of Eastern Siberia: seasonal dynamics, morphological properties, and enzymatic activity. 3rd All-Russian Conference with International Participation: “Ecology and Geochemical Activity of Microorganisms in Extreme Habitats”: 72-73. DOI: [10.53954/9785604859865](https://doi.org/10.53954/9785604859865)
- MUK 4.2.1884-04. 2004. Sanitarno-mikrobiologicheskii i sanitarno-parazitologicheskii analiz vody poverkhnostnykh vodnykh ob'yektov [Sanitary-microbiological and sanitary-parasitological analysis of water in surface water bodies]. (in Russian) URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200039680/>
- MUK ECSD F 12.15.1-08. 2008. Metodicheskie ukazaniya po otboru prob dlya analiza stochnikh vod. [Guidelines for sampling for wastewater analysis]. (in Russian) URL: <https://www.gostrf.com/normadata/1/4293831/4293831616.htm>
- Namsaraev B.B. et al. 2008. Ecology of microorganisms of extreme aquatic ecosystems. Ulan-Ude: BSU Publishing House. 94 p.
- On approval of norms of maximum permissible impacts on the unique ecological system of Lake Baikal and the list of harmful substances, including substances belonging to the categories of especially dangerous, highly dangerous, hazardous, and moderately dangerous for the unique ecological system of Lake Baikal. 2020. Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation No. 83 of February 21, 2020.
- Parfenova V.V., Terkina I.L., Kostornova T.Ya. et al. 2008. Microbial community of freshwater sponges of Lake Baikal. *Izvestia RAS. Biological Series* (4): 435-445.
- Parfenova V.V., Pavlova O.N., Kravchenko O.S. et al. 2009. Study of local anthropogenic influence on horizontal and vertical distribution of microorganisms in the water of Lake Baikal. *Hydrobiological journal* 45 (2): 51-62.
- Podlesnaya G.V., Galachants A.D., Shtykova Yu.R. et al. 2022. Sanitary-microbiological assessment of water quality in Listvenichny Bay during the period of extremely high water level in Lake Baikal. *Geography and natural resources* 5: 163-169. DOI: [10.15372/GIPR20220517](https://doi.org/10.15372/GIPR20220517)
- Porter K.G., Feig Y.S. 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnology and Oceanography* 25: 943-948. DOI: 10.4319/lo.1980.25.5.0943

SanPiN 1.2.3685-21. 2021. Hygienic norms and requirements to ensure the safety and (or) harmlessness of habitat factors for human URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006938>

Shtykova Yu.R., Suslova M.Yu., Drucker V.V. et al. 2019. Microbiological water quality of Lake Baikal: a review. *Limnology and Freshwater Biology* 2: 210-217. DOI: [10.31951/2658-3518-2019-A-2-210](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2019-A-2-210)

Shtykova Yu.R., Suslova M.Yu., Kostornova T.Ya. et al. 2016. Monitoring of the sanitary-microbiological state of the pelagic zone of Lake Baikal and estuaries of large rivers flowing into it from 2010 to 2015. *Izvestiya Irkutsk State University. Series: Biology. Ecology* 17: 51-62.

Suslova M.Yu., Shtykova Yu.R., Sukhanova et al. 2019. The use of microbiological monitoring to assess the impact of the anthropogenic influence on the ecosystem of Lake Baikal. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 381 (1) DOI: [10.1088/1755-1315/381/1/012088](https://doi.org/10.1088/1755-1315/381/1/012088)

Suslova M.Yu., Podlesnaya G.V., Zimens E.A. et al. 2022. Sanitary-microbiological characteristics of the coastal zone of Lake Baikal during the seasonal change in the lake level in 2022. *Limnology and Freshwater Biology* (6): 1724-1727. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-6-1724](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-6-1724)

Timoshkin O.A., Bondarenko N.A., Volkova E.A. et al. 2014. Mass development of green filamentous algae of the genera *Spirogyra* and *Stigeoclonium* (Chlorophyta) in the coastal zone of South Baikal. *Hydrobiological Journal* 5:

15-26. DOI: [10.1615/HydrobJ.v51.i1.20](https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v51.i1.20)

Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M. et al. 2016. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? *Journal of Great Lakes Research* 42 (3): 487-497. DOI: [10.1016/j.jglr.2016.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011)

Trukhina G.M., Yaroslavtseva M.A., Dmitrieva N.A. 2022. Modern trends of sanitary microbiology in the implementation of sanitary-epidemiological supervision over the safety of water bodies. *Public health and habitat* 30 (10): 16-24. DOI: [10.35627/2219-5238/2022-30-10-16-24](https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-10-16-24)

Tulokhonov A.K. 2009. System approach to nature management in the Baikal region. *Geography and natural resources* 30 (3): 224-228. DOI: [10.1016/j.gnr.2009.09.004](https://doi.org/10.1016/j.gnr.2009.09.004)

Wetzel R., Likens G. 2000. *Limnological Analysis*. New York: Springer, pp. 57–112.

Zagainova A.V., Trukhina G.M., Rakhmanin Yu.A. et al. 2020. Reason for the introduction of “Generalized coliform bacteria” and “*Escherichia coli*” as indicators of fecal contamination into the scheme of sanitary-microbiological control of water quality. *Hygiene and sanitation* 99 (12): 1353-1359. DOI: [10.47470/0016-9900-2020-99-12-1353-1359](https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-12-1353-1359)

Zemskaya T.I., Zakharenko A.S., Rusanov I.I. et al. 2019. Ecology of estuarine water areas of small rivers in South Baikal according to chemical and microbiological studies in spring. *Microbiology* 88 (6): 673-684. DOI: [10.1134/S002636561906020X](https://doi.org/10.1134/S002636561906020X)

Оценка качества воды озера Байкал и его притоков в местах воздействия локального загрязнения по микробиологическим и гидрохимическим данным



Марциничко А.С., Чебыкин Е.П., Чебунина Н.С., Захарова Ю.Р.*

Лимнологический институт Сибирского Отделения Российской Академии Наук, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

АННОТАЦИЯ. Проведена оценка качества воды озера Байкал и его притоков, находящихся под влиянием семи различных источников локальных загрязнений: в районах сброса сточных вод из канализационных очистных сооружений (КОС) городов Слюдянка, Байкальск, Северобайкальск, а также стока хозяйственно-бытовых вод турбаз и поселка Максимиха, стока вод горячих источников из ванн для купания в бухте Змеиная, лежбищ байкальской нерпы и туристического центра на острове Тонкий архипелага Ушканьи острова в сентябре 2022 г. Воды озера и рек Похабиха, Максимиха и Тья при помощи методов микробиологического и гидрохимического анализа оценены как чистые II класса качества (ГОСТ 17.1.3.07-82), за исключением прибрежной акватории напротив устья реки Похабиха, где вода определена как умеренно загрязненная. Неравномерное распределение значений коэффициента самоочищения свидетельствует о высокой численности микрофлоры аллохтонного происхождения и низкой активности автохтонных микроорганизмов, участвующих в процессах самоочищения в исследуемых районах озера. Установлено, что сбрасываемые очистными сооружениями сточные воды, вода в устье и поверхностная вода Байкала в приустьевой акватории реки Похабиха, вода в купальных ваннах горячих источников б. Змеиная не соответствуют требованиям СанПиН 1.2.3685-21 по предельно допустимому количеству обобщенных колиформных бактерий, *Escherichia coli* и *Enterococcus*. На всех контрольных станциях пелагиали озера Байкал, удаленных от исследованных локальных мест загрязнений, показатели качества воды не превышали нормативы безопасности воды поверхностных водных объектов по микробиологическим и гидрохимическим параметрам.

Ключевые слова: озеро Байкал, качество воды, органотрофные и психрофильные бактерии, санитарно-микробиологические показатели

Для цитирования: Марциничко А.С., Чебыкин Е.П., Чебунина Н.С., Захарова Ю.Р. Оценка качества воды озера Байкал и его притоков в местах воздействия локального загрязнения по микробиологическим и гидрохимическим данным // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 998-1019. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-998

1. Введение

Воды озера Байкал являются объектом I и II категорий водопользования (СанПиН 2.1.3684-21), то есть используются в качестве источника питьевого, хозяйственно-бытового водопользования и водоснабжения предприятий пищевой промышленности, а также в рекреационных целях. Однако, известно, что в локальных участках литоральной зоны озера происходят негативные изменения, как например, массовый рост нитчатых водорослей, (Timoshkin et al., 2014; 2016), гибель губки, повы-

шение концентраций фосфатов и нитратов, численности органотрофных бактерий, в том числе группы кишечной палочки (Земская и др., 2019). Причинами снижения качества прибрежных байкальских вод являются увеличение рекреационной нагрузки и сброс неочищенных сточных вод из КОС, расположенных на берегу Байкала населенных пунктов (Drucker et al., 2023).

В последнее время регулярные микробиологические исследования неоднократно фиксировали повышенные санитарно-бактериологические показатели в озере Байкал и его притоках (Штыкова

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: julia.zakharova@gmail.com (Ю.Р. Захарова)

Поступила: 28 июня 2024; **Принята:** 10 июля 2024;

Опубликована online: 30 августа 2024

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



и др., 2016; Подлесная и др., 2022; Suslova et al., 2022; Мальник и др., 2019; 2022; Суслова и др., 2017). Представленные данные санитарно-бактериологической оценки качества воды подробно охватывают прибрежную акваторию Южного и Среднего Байкала (Мальник и др., 2019; Земская и др., 2019), устья рек в районах локального антропогенного влияния и пелагические станции стандартных гидрологических разрезов акватории озера (Shtykova et al., 2019; Suslova et al., 2019; Drucker et al., 2023). Изучение возможного постоянного поступления санитарно-показательных бактерий и сохранения их жизнеспособности в озере Байкал в комплексе с определением других групп органотрофных микроорганизмов важно для оценки качества байкальской воды (Elovskaya et al., 2022).

Цель работы – определить численность и распределение микроорганизмов, в том числе санитарно-показательных и оценить состояние процессов самоочищения озера Байкал в районах влияния источников локальных загрязнений. В нашей работе в каждом районе, связанном с локальным загрязнением, исследовано от 6 до 13 точек, которые включали места выпуска сточных вод, районы рек до и после выпуска сточных вод, устья рек, литоральную

зону на разном расстоянии от берега и пелагическую зону. Такая схема отбора проб позволила провести оценку общей численности микроорганизмов, культивируемых органотрофных психрофильных и мезофильных бактерий, а также определить санитарно-показательные бактерий и их распространение от мест локального загрязнения по направлению к Байкалу.

2. Материалы и методы

Районы исследования и отбор проб. В течении комплексной кругобайкальской экспедиции с 05 по 15 сентября 2022 г. исследовали семь районов влияния источников антропогенного и естественного загрязнения на озеро Байкал: г. Слюдянки (р. Похабиха, сточные воды КОС); г. Байкальска (пруд-аэратор БЦБК, сточные воды КОС); п. Максимиха (Баргузинский залив, турбазы), о. Тонкий (Нерпа-центр), о. Тонкий (лежбище нерп), б. Змеиная (Чивыркуйский залив, термальные источники), г. Северобайкальска (р. Тья, сточные воды КОС) (Рис.). Отбор проб сточных, речных и поверхностных вод литорали на расстоянии 2 м и 50 м от берега, а также фоновые участки пелагиали озера на

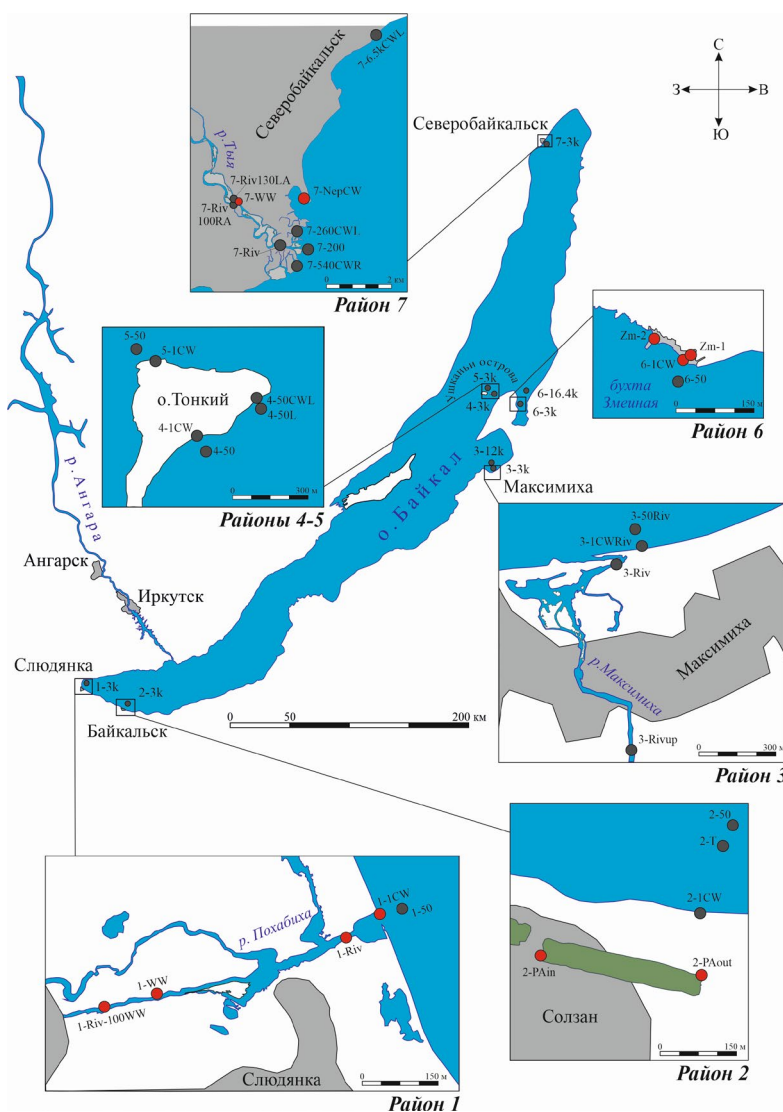


Рис. Карта-схема районов отбора проб в реках, устьях рек, литорали и пелагиали озера Байкал Черная заливка – значения санитарно-микробиологических показателей не превышают норматив, красная заливка – значения показателей превышают норматив.

расстоянии 3 км и более от источников загрязнений осуществляли согласно нормативным документам (ГОСТ 31942-2012, МУК ПНД Ф 12.15.1-08, ГОСТ 31861-2012). Пробы воды отбирали в реках, устьях рек и приустьевых участках литорали с поверхностного слоя воды (0,5 м) в предварительно стерилизованную 1,5 л бутылку с лодки, а в пелагической зоне с глубин 0, 5, 10, 15, 20, 25 м (интегральная проба 0–25 м) с помощью пробоотборника SBE32 Carousel Water Sampler с борта НИС «Г.Ю. Верещагин». Всего проанализировано 210 образцов воды, отобранных на 42 станциях отбора проб (Таблица 1).

Общую численность микроорганизмов (ОЧМ) учитывали методом прямого счета препаратов, окрашенных DAPI (4,6-diamidino-2-phenylindole) (Porter and Feig, 1980), с использованием эпифлуоресцентного микроскопа (Axiovert 200 Zeiss, Германия).

Органотрофные бактерии определяли при разных условиях культивирования. Рыбо-пептонный агар, разбавленный в 10 раз (РПА/10) использовали для определения численности автохтонной микрофлоры, естественной для данного водоема, посеы инкубировали при 22°C в течение 72 ч (ОМЧ, 22°C) (Горбенко, 1961). На мясо-пептонном агаре (МПА) после инкубации при 37 ± 1 °C в течение 24 ч. определяли численность аллохтонной микрофлоры, привнесенной в водоем в результате антропогенного загрязнения (ОМЧ, 37°C). Коэффициент самоочищения (КС) определяли по соотношению значений показателя ОМЧ, определённых при температурах 22°C и 37°C. Среду R2A использовали для культивирования психрофильных микроорганизмов (ПМ) при T 10°C в течение 10 суток.

Санитарно-микробиологические показатели определяли в соответствии СанПиН 1.2.3685-21. Обобщенные колиформные бактерии (ОКБ), *E. coli*, определяли методом мембранной фильтрации на дифференциально-диагностической среде Эндо, бактерии рода *Enterococcus* (ЭК) на агаризованной азидной среде Энтерококкагар. Анализ результатов проводили согласно ГОСТ 24849-2014.

Физико-химические параметры воды: pH, температура (Т), электропроводность (ЕС), концентрации O_2 , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- были измерены стандартными методами согласно Wetzel and Likens (2000), Руководству по химическому анализу поверхностных вод суши (2009) в аккредитованной лаборатории гидрохимии и химии атмосферы, как описано ранее (Мальник и др., 2019).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Физико-химическая характеристика воды в районах исследования

Во всех районах исследования пробы воды были отобраны с солнечную безветренную погоду при T воздуха от 10°C до 25°C. T поверхности воды колебалась в пределах 6.4 – 10.1°C в реках Похабиха, Максимиха и Тья. По направлению от устьев рек от берега до фоновых станций в пелагиали поверхностная вода Байкала была прогрета в среднем до 13.6 ± 4.5 °C, кроме района напротив устья реки Похабиха

(6.5 – 7.5°C) и в прибрежной воде правее от устья реки Тья (7.7°C). T сточных вод, отобранных из КОС городов Слюдянка, Байкальск и Северобайкальск, была более высокой (14.2 – 19.8°C), в горячих источниках бухты Змеиная зафиксировано 42.8°C (Zm-1) и 39,3°C (Zm-2). Значения pH во всех речных и байкальских образцах варьировали в слабощелочном диапазоне от 7.63 до 8.67, в горячих источниках были щелочные показатели (9.6), в сточных водах из КОС города Северобайкальск зафиксирована слабокислая среда (5.24). Максимальные значения электропроводности (ЕС) определены в сточных водах и горячих источниках (до 864 мкСм/см). В воде рек Похабиха и Максимиха значения ЕС (240 мкСм/см и 156 мкСм/см) были выше чем в среднем в байкальской воде (127 мкСм/см) и наоборот в воде реки Тья (98 мкСм/см) меньше чем в байкальской. Концентрации растворенного кислорода (O_2) в речной и озерной воде варьировали в узком диапазоне 8.9 – 12.6 мг/дм³ (Таблица 1).

Содержание SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , NO_2^- и NH_4^+ в сточных водах, сбрасываемых централизованными и локальными системами водоотведения поселений или городских округов в пределах центральной экологической зоны, а также непосредственно в озеро Байкал нормируются согласно приказа Минприроды России от 21.02.2020 № 83 и отнесены к категории «умеренно опасных» вредных веществ. В сточных водах от города Слюдянка, сбрасываемых в реку Похабиха выявлено превышение допустимых нормативов содержания PO_4^{3-} (по фосфору) в 13 раз, NH_4^+ в 90 раз. В сточных водах от города Северобайкальск, сбрасываемых в реку Тья содержание PO_4^{3-} (по фосфору) превышало допустимые нормативы в 19.7 раза, NO_3^- в 17.4 раза, NH_4^+ в 7.3 раза. Сточные воды от города Байкальск, отобранные из пруда-аэротатора и после отстаивания в нем сбрасываемые непосредственно в озеро Байкал так же содержали высокие концентрации вредных веществ. Содержание PO_4^{3-} (по фосфору) превышало допустимый норматив в 23 раза, SO_4^{2-} в 3 раза, NO_3^- в 42.5 раз, NO_2^- в 150 раз и NH_4^+ в 45 раз.

Концентрации химических компонентов в реках и устьях рек были выше чем в озерной воде. Наиболее была выражена разница в содержании SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , NO_3^- , величина которых варьировала в речной воде 6.8-11 мг/дм³, 0.011-0.085 мг/дм³, 1.24-1.7 мг/дм³ соответственно и в озерной 5.6-8.1 мг/дм³, 0.003-0.020 мг/дм³, 0.1-1.4 мг/дм³ соответственно. При этом в озерной воде наибольшие концентрации биогенных элементов были в образцах, отобранных в устьях рек, прибрежной воде (2 м от берега) напротив устьев рек, и горячих источников. Наибольшие концентрации NH_4^+ и NO_2^- в реке (0.046 мг/дм³ и 0.011 мг/дм³) и устье реки Похабиха (0.93 мг/дм³ и 0.029 мг/дм³), в остальных образцах не превышали 0.013 мг/дм³ и 0.008 мг/дм³, соответственно (Таблица 1). Повышенные концентрации биогенных элементов в устье реки Похабиха (1-Riv) и приустьевой акватории (1-1CW) могут свидетельствовать о влиянии недостаточно очищенных сточных вод на химический состав воды.

Таблица 1. Описание места отбора проб и физико-химические показатели воды на участках исследований в сентябре 2022 г.

Станция	Описание станции	Т, °С	pH	ЕС, мкСм/см	O ₂	мг/дм ³						SO ₄ ²⁻
						PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	
1-Riv100WW	Река Похабиха (РП), в 100 м выше места сброса сточных вод	6.4	8.27	220.6	11.8	0.030	1.700	0.011	0.046	10		
1-WW	Труба сброса сточных вод города Слюдянка	14.2	7.47	863	НД	3.9	0.38	0.170	36	37		
1-Riv	р. Похабиха, устье	7.6	8.16	240.9	12.2	0.082	1.7	0.029	0.93	11		
1-1CW	2 м от берега напротив устья РП	6.5	8.11	173.9	12.6	0.020	1.4	0.010	0.22	8.1		
1-50	50 м от берега напротив устья РП	6.7	8.14	127.6	12.2	0.003	0.54	0.004	0.017	6.1		
1-3k	3 км от берега напротив устья РП	7.5	7.95	123.8	НД	0.003	0.27	0.004	<0.013	6.0		
2-PAin	Пруд- Аэрагор (ПА) со сточными водами из города Байкальск	17.5	7.5	279	НД	0.75	32.9	0.019	0.123	18		
2-PAout	ПА, сливной колодец	15.8	7.1	266	НД	0.68	24.2	0.15	0.452	17		
2-1CW	2 м от берега напротив ПА	12.2	7.76	138.4	9.8	<0.003	0.92	<0.003	<0.013	8.0		
2-Г	вода над трубой сброса из ПА	12.2	8.28	123.7	11.1	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.5		
2-50	50 м от берега напротив ПА	12.2	8.31	123.7	10.0	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.6		
2-3k	3 км м от берега напротив ПА	11.1	8.08	123.4	НД	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.1		
3-Rivup	р. Максимиха (РМ), 780 м выше устья	10.1	7.96	155.7	10.6	0.030	0.25	0.004	<0.013	6.8		
3-Riv	устье РМ	10.1	8.08	163.6	11.0	0.025	0.24	0.003	<0.013	10		
3-1 CWRiv	2 м от берега напротив устья РМ	14.2	8.07	132.5	9.5	0.006	<0.1	0.003	<0.013	7.1		
3-50Riv	50 м от берега напротив устья РМ	15.4	8.08	128.8	9.4	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.8		
3-3k	3 км от берега напротив устья РМ	15.1	7.63	128.5	НД	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.7		
3-12k	12 км от берега напротив устья РМ, выход из Баргузинского залива	13.6	7.92	126	НД	<0.003	<0.1	0.008	<0.013	6.3		
4-1CW	2 м от берега напротив Нерпа-центра (НЦ), остров Тонкий	13.5	8.11	127.9	10.0	0.003	<0.1	0.006	0.028	6.3		
4-50	50 м от берега напротив НЦ	13.7	8.06	126.2	11.5	<0.003	<0.1	0.003	<0.013	6.1		
4-50 CWL	270 м от 4-1 CW	13.3	8.48	126.6	10.9	0.003	<0.1	0.003	<0.013	6.2		
4-50L	50 м от станции 4-50 CWL	13.3	8.16	126.2	8.9	0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.4		
4-3k	3 км от берега напротив НЦ	13.8	7.99	126.2	НД	0.005	<0.1	0.004	<0.013	6.3		
5-1CW	2 м от берега напротив лежбища нерпы (ЛН), остров Тонкий	12.8	8.41	126.1	10.5	0.006	<0.1	0.003	<0.013	5.6		
5-50	50 м от станции 5-1 CW напротив ЛН	13.5	8.47	126.3	10.6	0.003	<0.1	<0.003	<0.013	5.6		
5-3k	3 км от берега напротив ЛН	13.2	7.99	124	НД	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	5.6		
Zm-1	горячий источник 1 (ГИ1), бухта Змеиная	48.2	9.54	571	НД	<0.003	0.15	0.006	0.62	121		
Zm-2	горячий источник 2 (ГИ2), бухта Змеиная	39.3	9.63	864	НД	<0.003	0.10	0.006	0.68	166		

Станция	Описание станции	Т, °С	pH	ЕС, мкСм/см	O ₂	мг/дм ³				NH ₄ ⁺	SO ₄ ²⁻
						PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₂ ⁻		
6-1CW	2 м от берега напротив ГИ1	15.6	8.24	141.2	9.0	0.008	<0.1	<0.003	<0.013	15	
6-50	50 м от берега напротив ГИ1	14.3	8.3	130.7	9.5	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.8	
6-3к	3 км от берега напротив ГИ1	14.9	8.04	126.3	НД	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.0	
6-16.4к	16 км от берега напротив ГИ1, выход из Чивыркуйского залива	14.6	8.08	126.5	НД	<0.003	<0.1	0.010	<0.013	6.0	
7-Riv130LA	р. Тья (РТ), левый рукав, 130 м выше сброса сточных вод	6.5	7.61	97.5	11.4	<0.003	0.56	<0.003	<0.013	9.6	
7-Riv100RA	РТ, правый рукав, 120 м выше сброса сточных вод	6.5	7.75	97.5	11.5	<0.003	0.55	<0.003	<0.013	9.7	
7-WW	Труба сброса сточных вод города Северобайкальск	19.8	5.24	699	НД	5.9	157	0.017	2.9	34	
7-Riv	650 м выше устья РТ	6.5	7.7	97.5	12.2	0.011	0.79	0.004	<0.013	9.7	
7-260 CWL	2 м от берега, 260 м слева от устья РТ	12.3	8.04	124.4	10.1	<0.003	<0.1	0.005	<0.013	6.9	
7-540 CWR	2 м от берега, 540 м справа от устья РТ	7.7	7.68	96	11.1	<0.003	0.46	<0.003	<0.013	9.2	
7-200	200 м от берега напротив устья РТ	12.5	8.14	122.1	10.3	<0.003	<0.1	0.014	<0.013	6.8	
7-6.5к CWL	2 м от берега, 6.5 км слева от устья РТ	13.4	8.67	124.2	10.4	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.6	
7-3к	3 км от берега напротив устья РТ	НД	8.15	125.4	НД	<0.003	<0.1	<0.003	<0.013	6.4	
7-Ner CW	2 м от берега, 1,5 км to слева от устья РТ, лодочная станция	НД	8.05	148.7	9.0	<0.003	0.23	0.006	<0.013	7.9	

Примечание: выделены значения, превышающие нормативы содержания вредных веществ в сточных водах, сбрасываемых (1) непосредственно в озеро Байкал, (2) централизованными и локальными системами водоотведения поселений или городских округов в пределах центральной экологической зоны согласно приказа Минприроды России от 21.02.2020 № 83: допустимое содержание SO₄²⁻ (1)5.53 и (2) + 50.0 мг/дм³, PO₄³⁻(по фосфору)(1)0.01 и (2)0.1 мгР/дм³, NO₃⁻ (1)0.57 и (2)9 мг/дм³, NO₂⁻ (1)0.001 и (2)0.2 мг/дм³ и NH₄⁺(1)0.01 и (2)0.4 мг/дм³

3.2. Распределение численности микроорганизмов и санитарно-микробиологических показателей

В результате микробиологического исследования семи районов (Рис., Районы 1–7) с различной антропогенной нагрузкой на литораль Байкала выявлена высокая численность бактерий и значительное превышение нормативов санитарно-микробиологических показателей в пробах воды отобранных непосредственно из самих источников загрязнения. Это были сточные воды, выпускаемые КОС от города Слюдянка в реку Похабиха и от города Северобайкальск в реку Тья, вода в прудах-аэратах города Байкальск, вода в горячих минеральных источниках бухты Змеиная в Чивыркуйском заливе (Таблица 2).

Район 1. ОЧМ (3.2×10^6 кл/мл) была максимальной выше выпуска очищенных сточных вод (1-Riv100WW) в реку Похабиха среди всех образцов из района г. Слюдянка, а соотношение ОЧМ/ОМЧ 22°C было более 10^3 , которое классифицирует воду согласно ГОСТ 17.1.3.07-82 как чистый водоем II класса. Соотношение ОЧМ/ОМЧ 22°C обычно служит для оценки санитарного состояния водоемов и характеризует трофическое статус биоценоза. Величина этого соотношения в водах, богатых лабильным органическим веществом, составляет 10^3 – 10^2 в умеренно-загрязненных III класса и менее 10^2 в загрязненных IV, V, VI класса качества водах, тогда как в чистых водоемах и водотоках II класса оно составляет более 10^3 (ГОСТ 17.1.3.07-82). При этом коэффициент самоочищения (КС) на станции 1-Riv100WW был 6.23, что соответствует завершённому процессу самоочищения при КС равном или более 4 (МУК 4.2.1884-04). Соотношение количественных показателей, отражающих общее содержание мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов в 1 мл исследуемой воды (ОМЧ, определённых при температурах 22 °C и 37 °C выражается в КС, с помощью которого можно оценить активность и состояние процессов самоочищения природных водоёмов (МУК 4.2.1884-04). В местах загрязнения хозяйственно-бытовыми сточными водами численные значения обеих групп близки. Показатель позволяет получать дополнительную информацию о санитарном состоянии водоемов, источниках загрязнения, процессах самоочищения.

В очищенных сточных водах КОС г. Слюдянка ОЧМ составила 27.6×10^6 кл/мл, а значения ОМЧ 22 °C и ОМЧ 37 °C были максимальными (2208 КОЕ/см³ и 29024 КОЕ/см³) из всех исследованных образцов. Влияние сточных вод было существенно заметно в устье реки 1-Riv и в байкальской воде приустьевой акватории на расстоянии 2 м от берега 1-1CW. По соотношению ОЧМ/ОМЧ 22°C (10^2) вода здесь относится к III категории качества и оценивается как умеренно загрязненная. Учитывая тот факт, что численность аллохтонной микрофлоры (ОМЧ 37°C), привнесённой в водоем была высокой, поэтому значения КС на этих станциях были низ-

кие 0.34 и 1.72, что указывает на высокую антропогенную нагрузку. При этом при оценке всех показателей численности микрофлоры на станциях в литорали на расстоянии 50 м от берега (1-50) и контрольной фоновой в пелагиали на расстоянии 3 км от берега (1-3к) вода соответствовала II классу качества, а высокий КС свидетельствовал об активных процессах самоочищения в озере.

В районе влияния г. Слюдянка превышение санитарно-микробиологических показателей обнаружено в очищенных сточных водах (1-WW), в устье реки Похабиха (1-Riv) и прибрежной воде озера (1-1CW) (Table 2). В исследовании были определены основные индикаторные показатели, используемые для оценки безопасности водных объектов согласно Сан ПиН 1.2.3685-21: обобщенные колиформные бактерии (ОКБ), *Escherichia coli* (*E. coli*), энтерококки (ЕС). Зафиксированные высокие значения ОКБ и на станциях 1-WW (3500 КОЕ/100 см³), 1-Riv (1350 КОЕ/100 см³), 1-1CW (976 КОЕ/100 см³) превышали нормативные показатели в 7, 2.7, 1.9 раз соответственно. Значения ОКБ снижались по мере удаления от места выпуска очищенных сточных вод и не превышало нормативы на станциях 1-50 и 1-3к. Недавно введенный с 1 января 2022 г (СанПиН 1.2.3685-21) показатель «Обобщенные колиформные бактерии» вместо общих колиформных бактерий с сохранением аббревиатуры ОКБ и прежними единицами измерений, учитывает не только лактозоположительные энтеробактерии, но и другие атипичные лактозаотрицательные колонии, производящие ферментацию D-глюкозы до кислоты и образования газа (Загайнова и др., 2020). Использование этого показателя связано с тем, что с нарастанием антропогенной нагрузки на водоемы, потеплением микроклимата, изменением пищевого поведения людей, ввозом импортных пищевых продуктов и бесконтрольным применением антибиотиков начали утрачиваться некоторые фенотипические свойства энтеробактерий, металлический блеск колоний и способность ферментировать лактозу (Трухина и др., 2022). Определение по двум биохимическим признакам дает возможность выявления бактерий семейства *Enterobacteriaceae*, гарантируя их присутствие в пределах допустимых нормативов (не более 500 КОЕ/100 см³).

Показатели *E. coli* на станциях 1-WW, 1-Riv, 1-1CW превышали предельно допустимые нормы в 35, 13.5, 9.7 раз, соответственно, при этом они не были обнаружены на станциях 1-50 и 1-3к. Для санитарно-микробиологического контроля воды водоемов взамен показателя «Термотолерантные колиформные бактерии» принят показатель *E. coli*, который лучше обеспечивает определение свежего фекального загрязнения в воде водоемов (СанПиН 1.2.3685-21). Это связано с тем, что кишечные палочки способны расти как при 37 °C, так и при 44 °C и преобладают в фекалиях человека и животных по сравнению с другими представителями термотолерантных колиформ (Zagainova et al., 2020, Трухина и др., 2022). Показатель *E. coli* предложен для всех видов поверхностных водных объектов и

Таблица 2. Содержание бактерий и санитарно-микробиологические показатели в пробах поверхностных вод в сентябре 2022 г.

Станция	ОЧМ, × 10 ⁶ кл/мл	ПФ	ОМЧ 22 °С	ОМЧ 37 °С	КС	ОКБ	ЭК	E. coli
1Riv100WW	3.2	680	324	52	6.23	268	100	0
1WW	27.6	НД	2208	29024	-	3500	84200	3500
1Riv	1.1	2908	1992	5848	0.34	1350	1650	1350
1-1CW	1.0	2856	1360	790	1.72	976	332	976
1-50	2.1	586	368	6	61.33	83	39	0
1-3k	1.4	25	32	0	32	9	0	0
2PAin	3.7	НД	1146	1400	-	12500	300	0
2PAout	6.3	НД	1258	1070	-	7300	200	0
2-1CW	0.4	103	76	4	19	192	0	0
2Т	1.5	18	8	0	8	110	0	0
2-50	1.8	8	13	0	13	65	0	0
2-3k	0.6	5	8	0	8	17	0	0
3-Rivup	НД	НД	1448	58	24.96	64	52	64
3-Riv	0.5	НД	98	2	49	140	0	0
3-1CWRiv	0.6	800	1112	43	25.86	34	0	34
3-50 Riv	0.6	166	808	60	13.46	21	1	0
3-3k	1.0	867	1408	4	352	13	0	0
3-12k	0.7	580	302	114	2.64	78	5	0
4-1CW	0.7	64	55	7	7.85	39	2	0
4-50 CWL	НД	НД	13	7	1.85	100	0	0
4-50	0.7	15	15	5	3	78	0	78
4-50L	НД	НД	5	0	5	108	0	0
4-3k	0.8	7	32	3	10.66	40	0	0
5-1CW	0.6	47	152	21	7.23	86	0	0
5-50	0.6	109	262	118	2.22	12	6	0
5-3k	1.8	42	156	66	2.36	4	0	0
Zm1	0.8	НД	302	127	-	1860	0	1860
Zm2	0.3	НД	2032	114	-	5240	60	5240
6-1CW	1.3	548	792	507	1.56	7	68	7
6-50	0.7	109	248	122	2.03	6	6	6
6-3k	3.0	181	608	240	2.53	17	0	0
6-16.4k	2.4	22	107	38	2.81	1	0	0
7-Riv130LA	0.1	НД	52	7	7.42	24	5	24
7-Riv100RA	0.2	НД	13	2	6.5	37	1	0
7-WW	5.6	НД	51	154	-	4700	0	0
7-Riv	0.3	НД	42	5	8.4	120	0	0
7-260 CWL	0.7	78	456	31	14.70	0	7	0
7-540 CWR	0.4	247	200	7	28.57	0	35	0
7-200	3.6	9	70	1	70	106	2	0
7-6.5kCWL	НД	НД	98	5	19.6	436	1	0
7-3k	1.5	22	92	30	3.06	0	0	0
7-НерсCW	1.3	164	285	54	5.27	20	128	0

Примечание: выделены значения, превышающие нормативы согласно СанПиН 1.2.3685-21, ОЧМ – общая численность микроорганизмов, ПФ – психрофильные микроорганизмы, ОМЧ – общее микробное число, ЭК – Enterococcus, ОКБ – общие колиформные бактерии, КС – коэффициент самоочищения, прочерк – данные отсутствуют.

нормируется не более 100 КОЕ/100 см³. Количество энтерококков (ЭК) также значительно превышало допустимые нормы на станции 1-Riv100WW в 10 раз (100 CFU/100 см³), 1-WW в 842 раза (84200 КОЕ/100 см³), 1-Riv в 165 раз (1650 КОЕ/100 см³), 1-1CW в 33.2 раза (332 КОЕ/100 см³), 1-50 в 3.9 раза (39 КОЕ/100 см³). Несмотря на то, что численность энтерококков уменьшалась по мере удаления от места выпуска сточных вод, несомненно очень высокие показатели этих индикаторных микроорганизмов свидетельствуют о наличии свежего фекального загрязнения и неблагоприятной эпидемиологической обстановке на всем участке исследования, за исключение фоновой станции пелагиали. Энтерококки являются постоянными обитателями кишечника человека и животных и в большом количестве выделяются во внешнюю среду. Нормативы, для воды источников поверхностных водоемов и сточной воды в местах выпуска в водоемы определены не более 100 КОЕ/100 см³, в зонах рекреации не более 10 КОЕ/100 см³. Характерные морфологические и физиологические особенности энтерококков к устойчивости воздействия факторов окружающей среды и некоторым дезинфектантам при водоподготовке, были ранее показаны в исследованиях представителей этой группы, изолированных из озера Байкал (Кравченко, 2009).

Микробиологические исследования в 2021-2023 гг. в районе выпуска сточных вод из КОС г. Слюдянка показали, что речная вода и прибрежная акватория находятся под воздействием сточных вод и поверхностного стока, что характеризуется высоким процентом проб, не соответствующих санитарно-бактериологическим требованиям (Suslova et al., 2022; Drucker et al., 2023). Анализ этих данных свидетельствует о неэффективной работе КОС, приводящей к выпуску недостаточно очищенных сточных вод в природный водоток и потенциальной эпидемиологической опасности воды в зонах рекреации.

Район 2. ОЧМ на станциях литорали и пелагиали озера в районе напротив выпуска сточных вод из пруда-аэратора, являющимся заключительным этапом КОС г. Байкальска варьировала в пределах 0.4 - 1.8 × 10⁶ кл/мл. Соотношение ОЧМ/ОМЧ 22°C было более 10³ и КС более 4, что классифицирует воду на всех исследуемых станциях как чистую. В очищенных сточных водах пруда-аэратора были определены высокие значения ОЧМ в воде на входе (2-PAin) 3.6 × 10⁶ кл/мл и на выходе (2-PAout) 6.3 × 10⁶ кл/мл. Значения ОМЧ 22 °C и ОМЧ 37 °C в воде прудов-аэраторов на входе и выходе так же были высокими (1146 КОЕ/см³ и 1258 КОЕ/см³) и (1400 КОЕ/см³ и 1040 КОЕ/см³) соответственно. Санитарно-микробиологические показатели в сточных водах превышали допустимые нормативы: ОКБ в 25 и 14.6 раз, а ЕС в 3 и 2 раза, соответственно. В воде прибрежной акватории напротив прудов-аэраторов и фоновой станции пелагиали ОКБ присутствовали в пределах допустимых нормативов и их численность снижалась по мере удаления от берега от 192 КОЕ/100 см³ до 17 КОЕ/100 см³. *E. coli* не была обнаружена ни в одном образце этого района.

В нашем исследовании не было выявлено превышения санитарно-микробиологических показателей в байкальской воде, в том числе и на станции находящейся над трубой выпуска сточных вод (2-T) в озеро. Однако высокие значения показателей ОКБ и ЭК, определенные нами сточных водах пруда-аэратора, а также выявленные ранее в поверхностной воде прибрежной зоны г Байкальска при проведении санитарно-бактериологического мониторинга в 2010–2023 гг. (Drucker et al., 2023) указывают на низкую эффективность очистки сточных вод.

Район 3. ОЧМ на станциях литорали Баргузинского залива и пелагиали озера напротив района расположения туристических баз возле п. Максимиха варьировала в пределах 0.5 - 1.0 × 10⁶ кл/мл. Соотношение ОЧМ/ОМЧ 22°C на станциях 3-Riv и 3-12k было более 10³, что классифицирует воду как чистую, а на станциях 3-1CW Riv. 3-50 и 3-3k, было в пределах 10³–10² и оценивает воду как умеренно загрязненную. Коэффициент самоочищения на всех станциях более 4 и свидетельствует о высоком потенциале воды к естественному самоочищению. Однако на выходе из Баргузинского залива (3-12k) КС составил 2.64, что указывает на незавершенный процесс самоочищения в этой акватории озера. Санитарно-микробиологические показатели не превышали нормативные значения на всех исследуемых станциях за исключением воды в реке Максимиха, отобранной на 780 м выше устья (3-Rivup), где значения ЭК превышали норматив в 5.2 раза (52 КОЕ/100 см³). Превышенный показатель ЭК указывает на факт свежего фекального загрязнения речной воды, которое происходит вероятно при попадании в воду фекальных стоков от жилых домов поселка или при выпасе домашнего скота. Как известно, вдоль побережья Байкала вблизи п. Максимиха существует более десятка баз отдыха и гостевых домов. При этом сток вод хозяйственно-бытового и фекального происхождения осуществляется без контролируемой очистки на территорию побережья. По данным Drucker et al. (2023) образцы прибрежных песчаных отложений контаминированы санитарно-показательными бактериями, что позволило отнести их по степени загрязненности к эпидемиологически опасным.

Районы 4 и 5. Остров Тонкий является одним из малых островов архипелага Ушканьи острова, где находится экологическая тропа «К лежбищу байкальской нерпы» и здесь регулярно проводятся экскурсии в летний туристический сезон. Для оценки антропогенного влияния на качество воды в прибрежной части и в пелагиали отобраны пробы с восточной стороны острова, где находится информационный «Нерпа центр» и останавливаются корабли для высадки туристов (Район 4, Рис.). Для оценки влияния жизнедеятельности байкальской нерпы на качество воды отобраны пробы с западной стороны острова, где находится лежбище нерп (Район 5, Рис.). Максимальные значения ОЧМ (1.8 × 10⁶ кл/мл) зафиксированы на станции 5-3k, в остальных пробах от 0.6 × 10⁶ кл/мл до 0.8 × 10⁶ кл/мл. Соотношение ОЧМ/ОМЧ во всех исследуемых

пробах было более 10^3 и оценивает воду как чистую (I-II класс качества). Однако на нескольких станциях выявлено, что численные значения ОМЧ 22 °С и ОМЧ 37 °С были близки и соответственно были низкие значения КС: 4-50 CWL - 1.85, 4-50 - 3, 5-50 - 2.22, 5-3к - 2.36. Наличие аллохтонных микроорганизмов по численности близких с численностью микроорганизмов автохтонного происхождения служит признаком повышенного локального поступления в воду привнесенных бактерий и пониженной активности бактерий естественно обитающих в озере. При этом превышений санитарно-показательных бактерий не выявлено, что указывает на отсутствие влияния туристической деятельности на эпидемиологическую обстановку в районе острова Тонкий.

Район 6. В прибрежной воде бухты Змеиная и пелагиали Чивыркуйского залива наибольшие значения ОЧМ зафиксированы на станциях 6-1CW (1.3×10^6 кл/мл), 6-3к (3.0×10^6 кл/мл) и 6-16.4к (2.4×10^6 кл/мл), соотношение ОЧМ/ОМЧ 22°С было более 10^3 . На всех исследуемых станциях КС был ниже 4 (1.56 - 2.81), что свидетельствует о незавершенных процессах самоочищения и локального загрязнения воды вследствие большой туристической нагрузки этой акватории залива. В местах массового купания людей в купальных ваннах горячих источников (Zm-1 и Zm-2) зафиксированы высокие значения ОКБ (1860 КОЕ/100 см³ и 5240 КОЕ/100 см³), что превышает допустимые нормативы в 3.72 и 10.48 раз соответственно. Также *E. coli* обнаружена в обоих купальных ваннах и превышает нормативные показатели в 18.6 (Zm-1) и 52.4 (Zm-2) раза, а количество ЭК в 6 раз в Zm-2. В прибрежной воде (6-1CW) напротив горячего источника (Zm-2) отмечено превышение энтерококков в 6.8 раз. На расстоянии от берега 50 м (6-50), 3 км (6-3к) и на выходе из Чивыркуйского залива (6-16.4к) санитарно-показательные бактерии выявлены в незначительных количествах, либо отсутствовали.

Превышения допустимых значений санитарно-микробиологических показателей согласно СанПиН 1.2.3685-21 в ваннах для купания, ручья стока и в урзе воды на расстоянии до 5 метров также были выявлены ранее (Suslova et al., 2022, Elovskaya et al., 2022). Очевидно, что количество купающихся не соответствует скорости обновления воды в ваннах, при этом температура воды горячих источников создает благоприятные условия для развития условно-патогенных колиформных бактерий. В связи с тем, что горячие источники являются объектами постоянного рекреационного посещения, необходимо информировать туристов о мерах безопасности при купании.

Район 7. ОЧМ в левом (7-Riv130LA) и правом (7-Riv100RA) рукаве р. Тья выше сброса сточных вод от КОС г. Северобайкальска была минимальной и составила 0.1×10^6 кл/мл и 0.2×10^6 кл/мл. Речная вода выше сброса КОС относится к чистой I-II класса качества при соотношении ОЧМ/ОМЧ 22°С более 10^3 и КС выше 4. В очищенных сточных водах КОС г. Северобайкальск (7-WW) ОЧМ

была максимальной и составила 5.6×10^6 кл/мл. В устье реки Тья (7-Riv), в прибрежной воде от устья (7-260CWL, 7-540CWR, 7-200, 7-NerCW) а также в пелагиали (7-3к) ОЧМ варьировала от 0.3×10^6 кл/мл до 3.6×10^6 кл/мл. На станциях приустьевой акватории вода по качеству соответствовала чистой в которой автохтонная микрофлора доминировала над аллохтонной и активны процессы самоочищения. КС здесь был высоким и варьировал от 8.4 до 70, но при этом на станции 7-3к был менее 4, что указывает на низкую активность естественной микробной популяции в пелагиали этого района. Значения ОКБ в 7-WW составили 4700 КОЕ/100 см³, что превышало нормативные показатели в 9.4 раза, в остальных образцах исследуемого района ОКБ обнаружены в допустимом нормативной документацией количестве или отсутствовали. Во всех образцах представители *E. coli* не были обнаружены, кроме 7-Riv130LA в котором количество (24 КОЕ/100 см³) не превышало допустимое значение. Превышение ЭК зафиксировано в прибрежной воде справа от устья реки (7-540 CWR) в 3.5 раза и залива Нептун (7-NerCW) в 12,8 раз, на остальных станциях количество ЭК было в пределах допустимых значений.

Высокие значения показателя ОКБ в 7-WW свидетельствуют о потенциальной опасности заражения энтеробактериями водотоков реки Тья в которые выпускают недостаточно очищенные сточные воды от КОС г. Северобайкальск. Лактозопозитивные энтеробактерии фекального происхождения из семейства *Enterobacteriaceae* родов *Escherichia*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Klebsiella*, наиболее часто выделяющиеся из объектов внешней среды, обычно этиологически сопряжены с регистрируемыми на тот период кишечными инфекциями (Трухина и др., 2022). Несоответствие требованиям СанПиН 1.2.3685-21 и превышение санитарно-микробиологических показателей в сточных водах и поверхностной воде приустьевой акватории реки Тья также были выявлены ранее при проведении микробиологического мониторинга (Shtykova et al., 2016, Drucker et al., 2023).

3.3. Распределение психрофильных микроорганизмов

Проведена оценка численности культивируемых психрофильных микроорганизмов (ПМ) на 28 станциях исследуемых районов. Наибольшие значения были зафиксированы на станциях Site 1 в речной воде и поверхностной воде приустьевой акватории литорали (от 586 КОЕ/см³ до 2908 КОЕ/см³). В целом количество ПМ превышало количество органотрофных бактерий, выросших на РПА/10 при 22°С (ТМС 22°С) примерно в два раза, а в пелагиали (1-3к) их количество было сопоставимо. В остальных исследуемых районах на прибрежных станциях литорали количество ПМ было больше (47 - 800 КОЕ/см³) чем в пелагиали (5-22 КОЕ/см³), за исключением 3-3к и 3-12к (867 КОЕ/см³ и 580 КОЕ/см³). Так же следует отметить, что в поверхностной

воде приустьевых акваторий и пелагиали количество ПМ значительно превышало количество мезофильных бактерий (ТМС 37°C). В районе б показано доминирование мезофилов, что может быть связано с благоприятным температурным режимом для развития этой группы микроорганизмов, который возникает вследствие стока воды из горячих источников и прогрева мелководной части Чивыркуйского залива.

Озеро Байкал, является местообитанием холодолюбивых микроорганизмов, которые, в большинстве своем, представлены психротолерантными формами с оптимумом роста 22 °C (Namsaraev et al., 2008, Марцинечко и Захарова, 2023). Культивируемые психрофилы были выделены из воды, эндемичных видов губки, донных осадков из разных районов Байкала, показана их высокая численность и ферментативная активность (Парфенова и др., 2008; 2009; Vabich et al., 2021, Марцинечко и Захарова, 2022). Микробное сообщество озера играет ключевую роль в формировании качества воды, самоочищении водоема, деструкции органического вещества и в поддержании естественного химического статуса водной среды (Tulokhonov, 2009). В нашем исследовании в образцах, отобранных в районе сброса сточных вод в КОС г. Слюдянка, культивируемые ПМ доминируют в органотрофном сообществе. Таким образом, ПМ являются многочисленными естественными микроорганизмами природного водоема и могут быть активными участниками процессов самоочищения водоема, что необходимо учитывать при оценке качества воды.

4. Заключение

При оценке качества воды семи районов акватории озера Байкал в сентябре 2022 года в зонах локального загрязнения, показано что соотношение ОЧМ/ТМС 22°C, которое служит для оценки санитарного состояния водоемов, было более 10³ и классифицирует воду согласно ГОСТ 17.1.3.07-82 как чистый водоем II класса. Исключение составили образцы воды, отобранные в устье реки Похабиха и в байкальской воде приустьевой акватории на расстоянии 2 м от берега, где по соотношению ОЧМ/ТМС 22°C (10²) вода была отнесена к III категории качества как умеренно загрязненная. Превышение численности естественных микроорганизмов водоема, в том числе и психротолерантных, над численностью привнесенных бактерий на станциях в устьях рек Тья и Максимиха, прибрежной акватории г. Байкальск, п. Максимиха, г. Северобайкальск и большинстве пелагических станций указывает на активность автохтонной микрофлоры. Низкий коэффициент самоочищения, определенный на станциях акватории устья реки Похабиха, о. Тонкий, б. Змеиная свидетельствует о высокой нагрузке микрофлорой аллохтонного происхождения и низкой интенсивности самоочищения на данных участках озера.

Установлено, что сточные воды, выпускаемые КОС городов Слюдянка, Байкальск,

Северобайкальск в поверхностные водотоки, вода в устье и поверхностная вода побережья Байкала в приустьевой акватории реки Похабиха, вода в купальных ваннах горячих источников б. Змеиная не соответствуют требованиям СанПиН 1.2.3685-21 по предельно допустимому количеству обобщенных колиформных бактерий, *Escherichia coli* и *Enterococcus*. Зафиксировано превышение нормативных требований по энтерококкам в речной воде в районе п. Максимиха, прибрежной воде бухты Змеиная в Чивыркуйском заливе и залива Нептун в районе г. Северобайкальск. На станциях литорали, расположенных в 50 м от берега и фоновых станциях в пелагиали озера Байкал на расстоянии 3 км и более от исследованных мест локальных загрязнений, показатели качества воды не превышали нормативы безопасности воды поверхностных водных объектов по микробиологическим и гидрохимическим параметрам.

Благодарности

Выражаем благодарность Суловой М.Ю., ответственной за деятельность аккредитованной лаборатории водной микробиологии ЛИН СО РАН., за ценные консультации и помощь в подготовке санитарно-микробиологических исследований. Работа выполнена в рамках государственного задания 0279-2021-0008 (121032300186-9)

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Список литературы

- Горбенко Ю.А. 1961. О наиболее благоприятном количестве «сухого питательного агара» в средах для культивирования морских гетеротрофных микроорганизмов. *Микробиология* 30 (1): 168-172.
- ГОСТ 17.1.3.07-82. 1982. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012472>
- ГОСТ 31942-2012. 2012. Вода питьевая. Отбор проб для микробиологического анализа URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097811>
- ГОСТ 24849-2014. 2014. Вода. Способ санитарно-бактериологического анализа для полевых условий URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200115427/>
- ГОСТ 31861-2012. 2012. Вода. Общие требования к отбору проб. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200097520>
- Загайнова А.В., Трухина Г.М., Рахманин Ю.А. и др. 2020. Обоснование введения в схему санитарно-микробиологического контроля качества воды показателей «Генерализованные колиформные бактерии» и «*Escherichia coli*» как показателей фекальной загрязненности. *Гигиена и санитария* 99 (12): 1353-1359. DOI: [10.47470/0016-9900-2020-99-12-1353-1359](https://doi.org/10.47470/0016-9900-2020-99-12-1353-1359)
- Земская Т.И., Захаренко А.С., Русанов И.И. и др. 2019. Экология приустьевых акваторий малых рек Южного Байкала по данным химических и микробиологических исследований в весенний период. *Микробиология* 88 (6): 673-684. DOI: [10.1134/S002636561906020X](https://doi.org/10.1134/S002636561906020X)

Кравченко О.С. 2009. Бактерии рода *Enterococcus* в озере Байкал: распределение, видовой состав, механизм адаптации. Автореф. дисс... канд. биол. наук. Улан-Удэ, Россия.

Мальник В.В., Тимошкин О.А., Сутурин А.Н. и др. 2019. Антропогенные изменения гидрохимических и санитарно-микробиологических показателей качества воды в притоках Южного Байкала (зал. Лиственничный). *Водные ресурсы* 46 (5): 533–543.

Мальник В.В., Сутурин А.Н., Горшкова А.С. и др. 2022. Качество воды мелководной зоны озера Байкал по санитарно-микробиологическим показателям. *География и природные ресурсы*. 43 (2): 84-93. DOI: [10.15372/GIPR20220209](https://doi.org/10.15372/GIPR20220209)

Марцинченко А.С., Захарова Ю.Р. 2022. Вертикальное распределение психрофильных и мезофильных микроорганизмов водной толщи озера Байкал. Сборник тезисов совместной научно-практической конференции студентов «Биотехнология в нашей жизни – 2022»: 17-19.

Марцинченко А.С., Захарова Ю.Р. 2023. Психрофильные микроорганизмы в озерах Восточной Сибири: сезонная динамика, морфологические свойства, ферментативная активность. 3-я Всероссийская конференция с международным участием «Экология и геохимическая деятельность микроорганизмов экстремальных местообитаний»: 72-73. DOI: [10.53954/9785604859865](https://doi.org/10.53954/9785604859865)

МУК 4.2.1884-04. 2004. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200039680/>

МУК ПНД Ф 12.15.1-08. 2008. Методические указания по отбору проб для анализа сточных вод URL: <https://www.gostrf.com/normadata/1/4293831/4293831616.htm>

Об утверждении нормативов предельно допустимых воздействий на уникальную экологическую систему озера Байкал и перечня вредных веществ, в том числе веществ, относящихся к категориям особо опасных, высокоопасных, опасных и умеренно опасных для уникальной экологической системы озера Байкал. 2020. Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 21 февраля 2020 г. № 83

Парфенова В.В., Теркина И.Л., Косторнова Т.Я. и др. 2008. Микробное сообщество пресноводных губок озера Байкал. *Известия РАН. Серия биологическая*. (4): 435-445.

Парфенова В.В., Павлова О.Н., Кравченко О.С. и др. 2009. Изучение локального антропогенного влияния на горизонтальное и вертикальное распределение микроорганизмов в воде оз. Байкал. *Гидробиологический журнал* 45 (2): 51-62.

Подлесная Г.В., Галачанц А.Д., Штыкова Ю.Р. и др. 2022. Санитарно-микробиологическая оценка качества воды в заливе Лиственничный в период экстремально высокого уровня воды в озере Байкал. *География и природные ресурсы* 5: 163-169. DOI: [10.15372/GIPR20220517](https://doi.org/10.15372/GIPR20220517)

Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. 2009. В: Боевой Л.В. (Ред.), Ч. 1. Ростов-на-Дону: НОК, 1150 с.

СанПиН 1.2.3685-21. 2021. Гигиенические нормы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200006938/>

Суслова М.Ю., Пестунова О.С., Парфенова В.В. 2017. Оценка качества вод р. Селенги и ее дельты

по санитарно-микробиологическим показателям. *Гидробиологический журнал* 53 (1): 74–84.

Трухина Г.М., Ярославцева М.А., Дмитриева Н.А. 2022. Современные тенденции санитарной микробиологии в реализации санитарно-эпидемиологического надзора за безопасностью водных объектов. *Здоровье населения и среда обитания* 30 (10): 16-24. DOI: [10.35627/2219-5238/2022-30-10-16-24](https://doi.org/10.35627/2219-5238/2022-30-10-16-24)

Штыкова Ю.Р., Суслова М.Ю., Косторнова Т.Я. и др. 2016. Мониторинг санитарно-микробиологического состояния пелагиали озера Байкал и устьев впадающих в него крупных рек с 2010 по 2015 г. *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология* 17: 51-62.

Babich O., Shevchenko M., Ivanova S. et al. 2021. Antimicrobial potential of microorganisms isolated from the bottom sediments of lake Baikal. *Antibiotics* 10 (8): 927. DOI: [10.3390/antibiotics10080927](https://doi.org/10.3390/antibiotics10080927)

Drucker V.V., Suslova M.Yu., Nebesnykh Yu.R. et al. 2023. Sanitary-bacteriological monitoring of water quality in Lake Baikal – from single/one-off studies to systematic annual expeditions. *Limnology and Freshwater Biology* 6 (6): 164-179. DOI: [10.31951/2658-3518-2023-A-6-164](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-A-6-164)

Elovskaya I.S., Chernitsyna S.M., Pavlova O.N. et al. 2022. Sanitary-microbiological characteristics of water in the area of the Zmeinyy thermal spring (Northern Baikal, Russia, 2022). *Limnology and Freshwater Biology* 6 (5): 145-155. DOI: [10.31951/2658-3518-2023-A-5-145](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2023-A-5-145)

Porter K.G., Feig Y.S. 1980. The use of DAPI for identifying and counting aquatic microflora. *Limnology and Oceanography* 25: 943–948. DOI: 10.4319/lo.1980.25.5.0943

Shtykova Yu.R., Suslova M.Yu., Drucker V.V. et al. 2019. Microbiological water quality of Lake Baikal: a review. *Limnology and Freshwater Biology* 2: 210-217. DOI: [10.31951/2658-3518-2019-A-2-210](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2019-A-2-210)

Suslova M.Yu., Shtykova Yu.R., Sukhanova et al. 2019. The use of microbiological monitoring to assess the impact of the anthropogenic influence on the ecosystem of Lake Baikal. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 381 (1). DOI: [10.1088/1755-1315/381/1/012088](https://doi.org/10.1088/1755-1315/381/1/012088)

Suslova M.Yu., Podlesnaya G.V., Zimens E.A. et al. 2022. Sanitary-microbiological characteristics of the coastal zone of Lake Baikal during the seasonal change in the lake level in 2022. *Limnology and Freshwater Biology* (6): 1724-1727. DOI: [10.31951/2658-3518-2022-A-6-1724](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2022-A-6-1724)

Timoshkin O.A., Bondarenko N.A., Volkova E.A. et al. 2014. Mass development of green filamentous algae of the genera *Spirogyra* and *Stigeoclonium* (Chlorophyta) in the coastal zone of Southern Baikal. *Hydrobiological Journal* 5: 15-26. DOI: [10.1615/HydrobJ.v51.i1.20](https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v51.i1.20)

Timoshkin O.A., Samsonov D.P., Yamamuro M. et al. 2016. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? *Journal of Great Lakes Research* 42 (3): 487-497. DOI: [10.1016/j.jglr.2016.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011)

Tulokhonov A.K. 2009. System approach to nature management in the Baikal region. *Geography and natural resources* 30 (3): 224-228. DOI: [10.1016/j.gnr.2009.09.004](https://doi.org/10.1016/j.gnr.2009.09.004)

Wetzel R., Likens G. 2000. *Limnological Analysis*. New York: Springer, pp. 57–112.