

Sanitary-bacteriological monitoring of water quality in Lake Baikal – from single/one-off studies to systematic annual expeditions

Drucker V.V., Suslova M.Yu., Nebesnykh Yu.R., Potapov S.A., Podlesnaya G.V.*, Belykh O.I.

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

ABSTRACT. The analysis of sanitary-bacteriological assessment of water quality in the littoral and pelagic zones of Lake Baikal for the whole period of microbiological studies of the ecosystem was carried out. It was established that such studies were single in the last century and only from the end of the century they began to be carried out all over the lake, and now they are carried out annually in the spring, summer and autumn periods over the whole water area of Lake Baikal and in the estuaries of large tributaries. The water quality of the lake was assessed and unfavourable areas in the littoral zone were identified for exceeding SanPiN standards. In 2021-2023, wastewater samples were taken after the treatment facilities in the Slyudyanka and Severobaikalsk towns, low efficiency of disinfection and inflow of opportunistic and pathogenic bacteria into Lake Baikal (bacterial pollution) were revealed. The scheme and periodicity of sanitary-bacteriological monitoring of the Lake Baikal ecosystem is proposed.

Keywords: Lake Baikal, sanitary-indicative bacteria, water quality, sanitary-bacteriological monitoring scheme

1. Introduction

The surface waters of our planet, including lakes, reservoirs, and rivers, as well as seas and oceans, are subject to constant anthropogenic impact. The ecosystem of Lake Baikal, which was included in the UNESCO World Natural Heritage List in 1996 due to the uniqueness and purity of its waters, has not escaped this impact. The ecological condition of fresh water bodies – the main sources of drinking water – is degrading worldwide, which leads to the disruption of evolutionary microbiocenoses and the development of opportunistic and pathogenic bacteria in them. Because of their unusual competitive ability, developed over 3 billion years of existence, microorganisms can inhabit all ecological niches, from polar regions to deserts. Water is one of the most favorable habitats for them; in aquatic ecosystems, microorganisms reach high numbers, being determining and necessary links in the cycle of chemical elements, providing the process of continuous creation and destruction of organic substances as a result of interconnected functioning.

Microbiological studies of the Baikal water and sediments have been carried out for about 100 years (Yasnitsky et al., 1927; Nechaeva and Salimovska-

ya-Rodina, 1935; Kuznetsov, 1951; Romanova, 1958; et al.). In the following years, abundance and biomass of bacterioplankton were studied not only in the southern part of the lake but also throughout the Baikal water area. Their interannual dynamics and vertical distribution, peaks in seasonal development, correlations with the dynamics of abundance and composition of phytoplankton, and changes in water temperature were established, the time of bacterial generation was determined, and work on identification of the species composition of cultured microbial communities was started (Egorova et al., 1952; Rodina, 1954; Kuznetsov, 1957; Kriss and Chebotarev, 1970). During this period of microbiology formation in Lake Baikal, the microbiologists from research institutions in Moscow and Leningrad played the main role, using their knowledge and experience.

Sanitary-bacteriological assessment of water quality implies the determination of a set of sanitary indicators – criteria reflecting the sanitary condition of the water body under study – in accordance with the requirements of regulatory documents. Sanitary indicators are fecal indicator bacteria (FIB). They are used worldwide to detect and prevent fecal contami-

*Corresponding author.

E-mail address: podlesnaya@lin.irk.ru (G.V. Podlesnaya)

Received: October 19, 2023; **Accepted:** November 03, 2023;

Available online: November 10, 2023

© Author(s) 2023. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



nation and associated risks to human health due to the likely presence of pathogenic bacteria and viruses. FIB include bacterial groups such as total coliform bacteria (TCB), thermotolerant coliform bacteria (TCB), fecal coliform bacteria (fecal coliforms), *E. coli*, Enterococci, Bifidobacterium, Bacteroides, and Clostridium spp., which are widely distributed in the feces of humans and most animals. Their levels in wastewater and feces are relatively high, so they are usually detected when fecal pollution is present in surface waters. Therefore, surface waters are monitored using the FIB abundance, for which standards are set by legislative documents for assessing the quality of the waters used. Such water quality studies were initiated much later in Lake Baikal.

2. Materials and methods

After the reorganization of Baikal Limnological Station into Limnological Institute of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences in 1961 and the foundation of the “Laboratory of Applied Microbiology” in 1972, headed by M.A. Messineva (Cand. Sc. Biology), who investigated microorganisms of sediments in Lake Baikal in the 1950s (Messineva, 1957), research of microorganisms of Lake Baikal became planned, systematic, and comprehensive. Since the purpose of our work is to analyze the conducted studies on sanitary-bacteriological monitoring of Lake Baikal water quality for the previous period of work and to develop a scheme of it for the unique oligotrophic water body, we do not list all microbiological works, as they are available on the website of Limnological Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, as well as in the monograph-summary of microbiological studies of water bodies and watercourses of the Baikal-Angara-Yenisei hydrosystem (Vinogradova et al., 2004).

In 2023, the Government of the Russian Federation approved a new Resolution No. 260 “Regulations on State Environmental Monitoring of the Unique Ecological System of Lake Baikal”, in which it established the procedure for its implementation. In paragraphs 8 “d” and 11 “e” it is obliged to provide information to “the federal state budgetary institution “Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences” in terms of the results of observations of the state of Lake Baikal”. In order to assess the previously conducted volumes and periodicity of research on sanitary-bacteriological monitoring of the Baikal ecosystem, as well as to discuss the current use of specific standard and new indicators, research methods, water sampling stations, seasons, and the frequency of their sampling, which is necessary for the development and implementation of the scheme of microbiological monitoring itself, we have analyzed the available published set of sanitary-bacteriological studies of the lake.

3. Results and discussion

The analysis of the results of sanitary-bacteriological studies of Lake Baikal showed that in this scientific direction, single works started in connection

with the construction of the Baikal Pulp and Paper Mill (BPPM) only in the late 1960s of the last century. Microbial communities of water and polluted sediment in the area of the BPPM wastewater influence were first described in 1970–1973 in the works of G.A. Goman (1973). Works were then carried out in this area to assess the abundance of anaerobic saprophytes, sulfate reducers, and methanogens; rates of protein decomposition, cellulose decomposition, sulfate reduction, and methane formation were determined; and a forecast was made about the deterioration of the ecological situation in case of further wastewater discharge (Namsaraev et al., 1995; Zemskaya et al., 1997).

The water quality of Southern Baikal and, mainly, near the B. Koty settlement and the Baikalsk town was investigated during this period by scientists of Research Institute of Biology of Irkutsk State University (Maksimova and Maksimov, 1989). Long-term results of these authors' studies showed stable differences in the Baikal water quality during all periods: at the station “1 km from the shore” of the B. Koty settlement, remote from industrial and agricultural zones, water quality at all depths was high, while near the Baikalsk town within a radius of up to 10 km at all depths, water did not meet standards for drinking water, recreational, and fishery activities.

In 1993, the researchers of Limnological Institute SB RAS, V.V. Drucker, T.Y. Kostornova, O.A. Molozhaya, and V.A. Afanasiev, started and completed an assessment of the water quality in the littoral and pelagic zones of the whole Lake Baikal up to maximum depths using sanitary-bacteriological indicators. It has been found that the lake pelagic zone has high water quality both at the surface and at all depths. Coastal waters near all settlements have low quality, and *E. coli* are detected in many samples. At the same time, microbiological monitoring of the major tributaries of Lake Baikal began to be conducted, which showed poor water quality in the estuaries of the Selenga, Barguzin, Bolshaya Goloustnaya, Turka, Tyta, Pereemnaya, and Pokhabikha rivers entering the lake in spring (Drucker and Maslenikov, 1998).

To determine the scope of distribution and identify opportunistic bacteria in the water of Lake Baikal throughout its water area, the staff of the Laboratory of Aquatic Microbiology of LIN SB RAS conducted for the first time the intentional long-term studies in different seasons of the year between 1997 and 2000 (Drucker and Panasyuk, 2002; Panasyuk and Drucker, 2002). Water samples were taken along standard hydrological transects at the central deep stations at different horizons and at the coastal stations near the western and eastern shores: 1. Maritui settlement – Solzan settlement; 2. Listvyanka settlement – Tankhoi settlement; 3. Kadilny Cape – Mishikha settlement; 4. Kharauz Strait – Krasny Yar Cape; 5. Anga River – Sukhaya River; 6. Boldakova River – Olkhonskiye Vorota Strait; 7. Ukhon Cape – Tonkii Cape; 8. Pokoyniki Cape – Ushkan Cape; 9. Elokhn Cape – Davsha settlement; 10. Kotelnikovskii Cape – Amnundakan Cape; 11. Baikalskoe village – Turali Cape; 12. Zavorotny Cape – Sosnovka River; 13.

Krestovy Cape – Khoboy Cape; 14. Tyva River – Nemnyanka River.

As a result of the studies, 898 strains of potentially pathogenic bacteria (PPB) were isolated in the littoral zone of the lake, which are representatives of 31 species belonging to the *Enterobacteriaceae* family and non-fermenting group of bacteria. The number of studied bacteria increased in the water during the summer and autumn periods and decreased during the winter months. Opportunistic bacteria were unevenly distributed throughout the lake's water area, and their populations increased significantly at the locations where untreated wastewater from different sources was dumped. The greatest abundance and species diversity of this group of bacteria are found in the water of Southern Baikal – the Listvyanka settlement, Port Baikal settlement, Baikalsk town; in Central Baikal – Barguzin and Chivyrkuy bays, the Selenga river delta, and Maloe More strait; in Northern Baikal – a section of the Baikal-Amur railway. The studied group of bacteria was not found throughout the entire water column in the pelagic zone of the lake at various sites (more than 30 stations). The dominant species of opportunistic bacteria isolated from the littoral waters of the lake were *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterobacter cloacae*, *Citrobacter freundii*, and *Burkholderia cepacia*. The opportunistic bacteria isolated from the Lake Baikal waters have multiple antibiotic resistances, hemolytic activity in human erythrocytes, the ability to cultivate at 37°C, and, therefore, carry a potential epidemiological hazard to public health (Drucker and Panasyuk, 2006). The authors proposed to use additionally for sanitary-bacteriological control of the Baikal water quality the detected potential-pathogenic bacteria, as well as bacteria of the *Enterococcus* genus: *E. faecium*, *E. avium*, *E. faecalis*, *E. mundtii*, *E. hirae*, *E. durans*, and *E. gallinarum*, as specific indicators of fecal (untreated) water inflow into the lake. Long-term studies have established that the main sources of pollution in the Baikal waters are untreated domestic wastewater from settlements located on the shores of the lake, agricultural enterprises, and tourist complexes, which do not have systems of disinfection, utilization, and removal of wastewater, as well as the increasing number of tourist boats, which do not have tanks for collecting domestic and bilge waters.

In 2000-2009, there was a trend towards an increase in sanitary-bacteriological indicators in water in the area of discharge of “decontaminated” wastewater from the Baikal Pulp and Paper Mill (Shchetinina et al., 2013). In view of the deteriorating sanitary situation, the authors of the paper conducted studies on the diversity and antibiotic resistance of bacteria isolated from water in the most anthropogenically influenced areas of the lake. Other authors have also found representatives of sanitary-bacteriological pollution – bacteria of the *Enterococcus* genus in the water of different areas of Lake Baikal (Kravchenko, 2009).

In addition to these microorganisms, toxic cyanobacteria that are harmful to humans were discovered in Lake Baikal water for the first time in Russia during that time (Tikhonova, 2006; Belykh et al., 2013;

Belykh et al., 2015). Different types and variants of toxins and the genes that produce them were studied. This new factor is crucial for the sanitary-bacteriological monitoring of the Baikal water quality because cyanobacterial blooms, which are currently the most significant and recognizable effects of eutrophication in water bodies worldwide, are already happening in various regions of Lake Baikal. The concentrations of microcystins and saxitoxins in samples of plankton and benthos from the lake were determined, and the degree of hazard of toxic cyanobacteria to human and animal health was assessed. It is shown that “blooming” of benthic cyanobacteria with the presence of toxin-producing species, which started on Lake Baikal in 2011, have now taken on the character of an ecological crisis and may have caused mass mortality of Baikal sponges (Belykh et al., 2017). In order to address the issue of including these bacteria in the official documentation on microbiological monitoring of the Baikal water quality, these new research findings unquestionably merit a proper evaluation.

In recent years, the Lake Baikal ecosystem has been undergoing serious ecological changes. Signs of eutrophication – intensive development of algae non-specific for the littoral of the lake, mass mortality of sponges, and blooming of toxic cyanobacteria – have been observed in the coastal areas of some regions (Timoshkin et al., 2016). The volume of discharges of poorly treated and untreated wastewater from settlements into the lake is growing, recreational loads are increasing, and the number of tourist vessels not equipped with tanks for collecting domestic and bilge water has sharply increased. The number of tourists coming to Lake Baikal in all seasons of the year has increased manifold. Thus, in 2019, their number reached 2.2 million. More than 40 zones of recreational development have been formed directly on the lake coast, where most of the tourist accommodation facilities are concentrated: camping sites, hotels, and holiday homes. Questions arise: how effectively do septic tanks work in tourist recreation areas without damaging the Baikal ecosystem? How often does “Rosprirodnadzor” check the utilization of household and bilge water on tourist motorboats?

Since 2000, Limnological Institute SB RAS has developed a practice of conducting complex expeditions throughout Lake Baikal, in which microbiologists are constantly involved. It goes without saying that expeditionary work throughout Lake Baikal has been carried out before, but the complexity of the research was limited by the lack of necessary instruments for simultaneous collection of a large number of water and sediment samples, rapid measurement of abiotic parameters to maximum depths, etc. To date, only Limnological Institute has a research fleet equipped with the necessary instruments for scientific limnological studies in Lake Baikal. For this reason, sanitary-bacteriological monitoring of the water quality of Lake Baikal and its tributaries is carried out by the staff of the Laboratory of Aquatic Microbiology of the Institute, which has all necessary modern equipment and separate facilities for sanitary-bacteriological monitoring of the Lake Baikal

water quality by classical and modern molecular-biological methods. The Laboratory of Aquatic Microbiology is accredited in the national system of Rosakkreditation (№ RA.RU.21JI02).

Sanitary-bacteriological monitoring of the Baikal water quality carried out during 2010–2023 in the annual spring (second half of May–early June), summer (August), and autumn (second half of September) Circum-Baikal expeditions showed that FIB are constantly present in the coastal part of the lake. Littoral zone of the lake showed a significant amount of coliform bacteria and enterococci in Listvyanka settlement, Baikalsk town, Kultuk settlement – the southern part of the lake; in the waters of the Maloe More and Olkhonskiye Vorota straits and the Selenga delta – the central basin; in the Severobaikalsk town, and the Zarechny settlement – the northern part of the lake (Shtykova et al., 2016, 2018b; Suslova et al., 2017; Podlesnaya et al., 2022). In 2011, exceedance of the regulated water quality standards of the Russian Federation was observed throughout the entire pelagic zone of Lake Baikal, as well as in most of its major tributaries. In 2012 and 2015, an exceedance of sanitary-bacteriological indicators of pelagic waters was observed only in the southern part of the lake (Fig. 1). In September 2016, the maximum share of water samples with a low self-purification coefficient was recorded both in the pelagic zone (60%) and in the river mouths (62.5%).

In the waters of the estuaries of rivers flowing into the lake, the number of sanitary indicator-groups of bacteria in 2010–2020 was (Fig. 2), on average, by one order more than their content in the pelagic zone – the Goloustnaya, Buguldeika, Turka, Anga, Barguzin, Sukhaya rivers, as well as the Selenga delta (Drucker et al., 2022). The most unfavorable period for water quality was in August 2011 and May-June 2012, when the number of non-standard water samples was highest. In August 2010, May-June 2014, and September 2017, all river samples taken corresponded to “satisfactory”

surface water quality indicators.

In 2022–2023, besides the standard sanitary-bacteriological monitoring studies, we tested additional method – detection of fecal contamination using marker probes for bacteria (inhabitants of human and animal intestines), as well as detection of viral communities in water. Moreover, in 2021 the grid of sampling stations included treated wastewater from the treatment facilities of the Slyudyanka and Severobaikalsk towns, analyzed according to SanPiN 1.2.3685-21 “Hygienic standards and requirements to ensure safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans”. Also, 10 samples of sediments were taken in the coastal zone at various sites where tourists rest.

The results show notable exceedances of SanPiN norms in both years of the most recent investigations at 55 (170 water samples) and 59 (71 water samples) sites for the primary sanitary-bacteriological indicators. Thus, in 2023 these are the following areas the Baikalsk town, the Babushkin, Listvyanka, Tankhoy, B. Goloustnoye, and Posolsky Sor settlements, Peschanaya and Aya bays, and the bays of Maloe More (Bazarnaya, Kurkuts-kaya, Mandarkhan, Shida, and Khuzhirsky, Chivyrkuy bay – Kurbulik, Monakhovo, and Arangatui). The highest levels of these bacteria were found in the Babushkin town (*E. coli* in 1.7 times, enterococci in 20 times), the Listvyanka settlement (*E. coli* in 4 times, enterococci in 4.7 times), Chivyrkuy Bay (*E. coli* in 5.2 times, enterococci in 6.4 times) and Maloe More (enterococci in 4–6 times). Six out of seven tributaries, the rivers Pereemnaya, Snezhnaya, Solzan and Goryachiy Klyuch, also had exceedance values, especially the Pokhabikha (OCB in 11 times, *E. coli* in 58 times, Enterococci in 186 times) and the Medlyanka (OCB in 1.2 times, *E. coli* in 5 times, Enterococci in 63 times).

According to the results of analyses, the treated wastewater from the Slyudyanka wastewater treatment plant does not meet the requirements of SanPiN 1.2.3685-21 and exceeded the following indicators

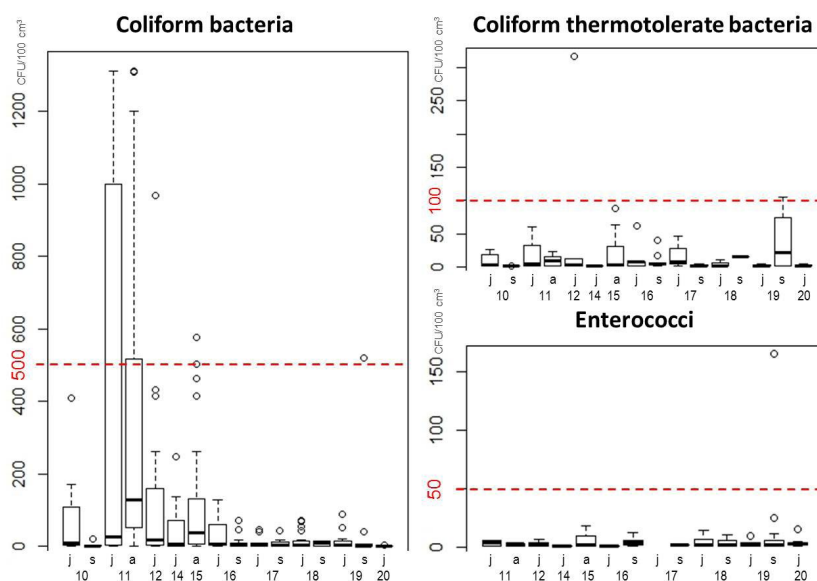


Fig.1. Abundance of sanitary-microbiological indicators in the pelagial water zone of Lake Baikal in 2010–2020 data (j–June, a–August and s–September). Red color –the standards.

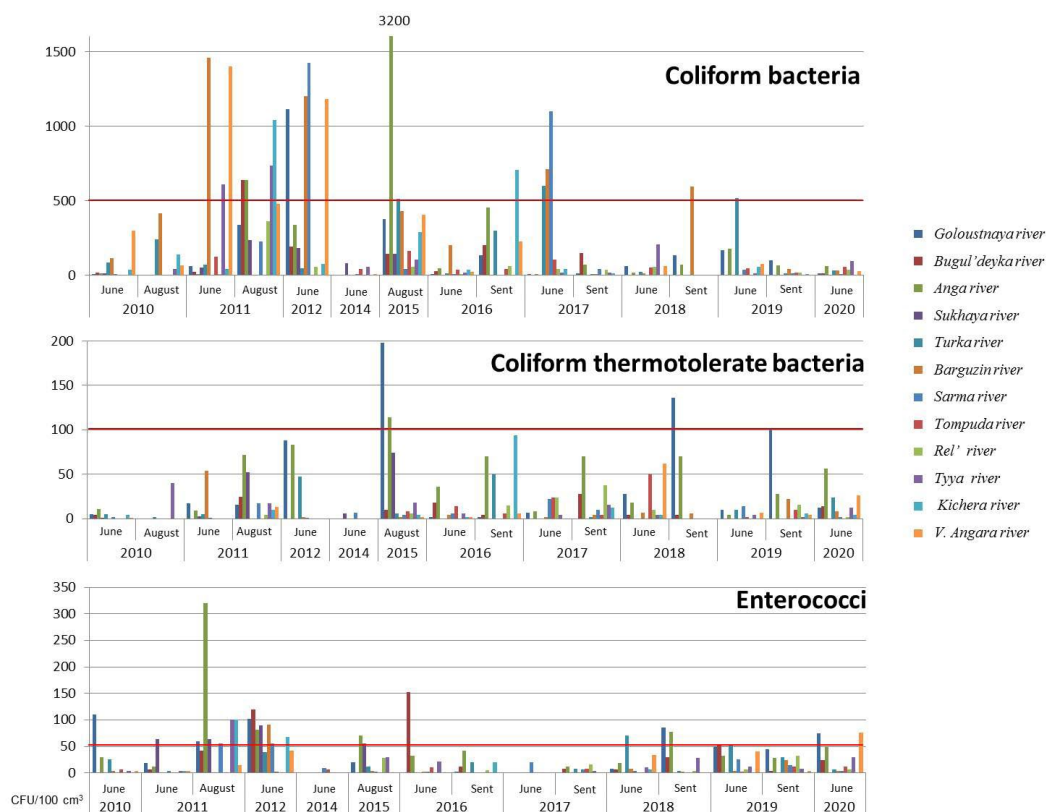


Fig.2. Abundance of sanitary-microbiological indicators in water of the tributaries in 2010-2020 data. Red color –the standards.

(OCB in 4200 times, *E. coli* in 17000 times and Enterococci in 3600 times), which indicated the absence of disinfection stages. Similar results were obtained for the treated waste water from the waste water treatment plant in the Severobaikalsk town in 2022. Studies of 10 samples of coastal sandy sediments from different areas of Lake Baikal were characterized by different degrees of contamination with sanitary-indicative bacteria and enabled these areas to be classified into three groups according to the degree of epidemiological hazard:

1. extremely dangerous – the Slyudyanka town;
2. dangerous – the Kultuk, Maksimikha, Kurbulik, and Sakhyurta settlements, Aya and Zmeinaya bays;
3. moderately dangerous – the Baikalsk town, Khuzhir and B. Koty settlements.

Studies of the surface water in the pelagic zone of Lake Baikal both in previous years and in this period correspond to the norms of SanPiN 1.2.3685-21 and MUK 4.2.1884-04 “Sanitary-microbiological and sanitary-parasitological analysis of water in surface water bodies”, with single exceptions of samples for the number of OCB in 2011-2012, 2015, 2019, 2021-2022.

A collection of 172 cultured opportunistic bacterial strains isolated from the Lake Baikal plankton, epilithon, treated wastewater and coastal sediments of the lake was created. Sixty-two strains isolated from biofilms and surface water samples were analyzed by modern identification methods (molecular-genetic and mass-spectrometry analyses) (Shtykova et al., 2018a; Shtykova et al., 2020). A total of 18 genera and 21 species of opportunistic bacteria were identified by this

method. Among them are representatives of the order Enterobacterales of the genus *Yersinia*, *Citrobacter*, *Escherichia*, *Hafnia*, *Leclercia*, *Lelliottia*, *Enterobacter*, *Shigella*, of the order Pseudomonadales of the genus *Pseudomonas*, *Acitrobacter*, of the order Bacillales of the genus *Bacillus*, *Exiguobacterium* and *Staphylococcus*, of the family Aeromonadaceae of the genus *Aeromonas*, of the family Enterococcaceae of the genus *Enterococcus*, of the family Aerococcaceae of the genus *Aerococcus*, family Comamonadaceae of the genus *Delftia*, of the family Xanthomonadaceae of the genus *Stenotrophomonas*.

Species of opportunistic bacteria dangerous for human and animal health were isolated from different places throughout littoral zone of Lake Baikal. Thus, bacteria of the genus *Aeromonas* are the most widespread, were found in Maloe More Strait in Bazarnaya Bay and in Khuzhir-Nagaysky Bay, in Khool Bay, near the Khuzhir, Listvyanka settlements, B. Koty, and B. Goloustnoye settlements, and in Aya Bay. Bacteria of the genus *Enterococcus* are found in many bays of Maloye More. The strains of *E. coli* were detected in different water areas of the lake – in bays of Mukhor and Khool, near the settlement of B. Koty, and near the Ushkan Islands. We took into account that from 2022, according to new changes in SanPiN 1.2.3685-21, *E. coli* bacteria and enterococci are obligatory indicators in the sanitary-microbiological assessment of water quality.

In 2021-2023, wastewater samples were taken after the treatment facilities in the Slyudyanka and Severobaikalsk towns, low efficiency of disinfection and inflow of opportunistic and pathogenic bac-

teria into Lake Baikal were revealed (Potapov et al., 2023). Seventy bacterial strains isolated from water and 17 strains from wastewater treated at Slyudyanka treatment plant were subjected to antibiotic sensitivity tests, and the results revealed antibiotic resistance to all tested broad-spectrum antibiotics used to treat infectious diseases (penicillins, cephalosporins, carbapenems, macrolides, aminoglycosides, tetracyclines, nitrofurans, etc.).

4. Conclusion

Analysis of the results of sanitary-bacteriological monitoring for the previous and present centuries clearly indicates a decrease in water quality in the coastal zone of Lake Baikal, as well as in the tributaries of its southern basin: the number of OCB, TCB, and enterococci has increased, exceeding the requirements of SanPiN 1.2.3685-21. Over the last decade, an increase in the number of enterococci was seen in the lake's deep-water area. The results obtained indicate that untreated or insufficiently treated wastewater flows into the rivers and the lake itself. According to sanitary-microbiological analyses, the Slyudyanka and Severobaikalsk wastewater treatment plants were inefficient during the studied period. Wastewater from the outlet pipes of the waste water treatment plants did not meet the requirements of SanPiN 1.2.3685-21, the number of coliform bacteria exceeded the normative values. A collection of 172 culturable opportunistic bacteria isolated from the Lake Baikal water, treated waste water and coastal sediments of the lake was created.

We propose the “Scheme of sanitary-bacteriological monitoring” as a result of the analysis of long-term studies of sanitary-indicative microorganisms in Lake Baikal, which calls for the determination of the water quality of the littoral and pelagic parts to be done throughout the year in all four seasons: winter (March), spring (late May-early June), summer (August), and autumn (late September-early October) (Fig. 3). The problem of preserving high-quality water is of great practical importance for Lake Baikal, which contains 20% of all fresh water on Earth, at the current time of global warming and increasing anthropogenic (biological and chemical) impact; regular sanitary-bacteriological monitoring will rapidly and reliably show trends in the trophicity of its ecosystem. The obtained data confirm that the waters of Lake Baikal are subjected to an intensive anthropogenic load, which has been steadily increasing in recent years. The distribution of FIB has an irregular, local character, caused by localization to the places of anthropogenic influence on the lake, which is also confirmed by the results of chemical analysis of the waters. The maximum number of sanitary-indicative bacteria is observed in the estuaries of rivers, gradually decreasing as the river water spreads into the lake. Based on the results of recent studies, it is suggested that under the influence of anthropogenic factors in coastal zones, there is a shift of autochthonous microbiota towards allochthonous microbiota characterized by high resistance to antibiotics. The introduction of

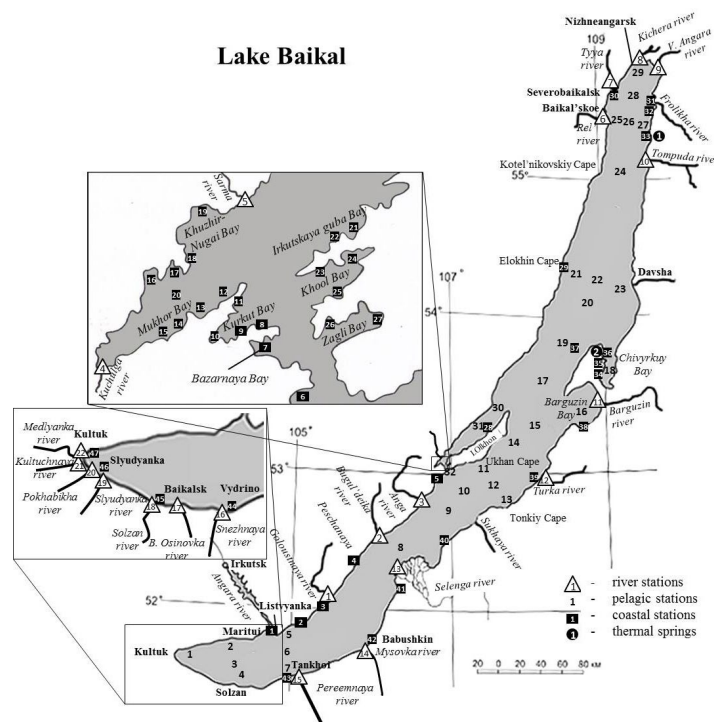


Fig.3. The scheme of sanitary-bacteriological monitoring of Lake Baikal. *River stations:* 1 – Goloustnaya, 2 – Bugul'deika, 3 – Anga, 4 – Kuchulga, 5 – Sarma, 6 – Rel', 7 – Tyya, 8 – Kichera, 9 – V. Angara, 10 – Tompuda, 11 – Barguzin, 12 – Turka, 13 – Selenga, 14 – Mysovka, 15 – Pereemnaya, 16 – Snezhnaya, 17 – B. Osinovka, 18 – Solzan, 19 – Slyudyanka, 20 – Pokhabikha, 21 – Kultuchnaya, 22 – Medlyanka. *Pelagic stations:* 1 – 12 km from Kultuk, 2 – 3 km from Maritui, 3 – Maritui–Solzan, 4 – 3 km from Solzan, 5 – 3 km from Listvyanka, 6 – Listvyanka–Tankhoi, 7 – 3 km from Tankhoi, 8 – Krasnyi Yar–Kharauz, 9 – Anga–Sukhaya, 10 – Boldakova–Malye Olkhonskie vorota, 11 – 3 km from Ukhan, 12 – Ukhan–Tonkiy, 13 – 3 km from Tonkiy, 14 – 7 km from Izhimei, 15 – Khoboi–Krestovyi, 16 – Barguzin Bay, 17 – Akademicheskii Ridge, 18 – Chivyrkui Bay, 19 – Solnechnaya–Ushkany Islands, 20 – Zavorotnyi–Sosnovka, 21 – 3 km from Elokhin, 22 – Elokhin–Davsha, 23 – 3 km from Davsha, 24 – Kotelnikovskiy–Amundakan, 25 – 3 km from Baikalskoe, 26 – Baikalskoe–Turali, 27 – 3 km from Turali, 28 – Tyya–Nemnyanka, 29 – 7 km from Nizhneangarsk, 30 – Aral–Khoboy, 31 – Maloye More Strait, 32 – Malye Olkhonskie vorota. *Coastal stations:* 1 – Listvyanka, 2 – B. Koty, 3 – B. Goloustnoe, 4 – Peschanaya Bay, 5 – Aya Bay, 6 – Tutaiski Bay, 7 – Bazarnaya Bay, 8 – Shchuchiy Bay, 9 – Radost' Bay, 10 – Kurkut Bay, 11 – Burlyuk Cape, 12 – Chukotka Bay, 13 – Mandarkhan Bay, 14 – Zuun-Khagun Bay, 15 – Baruun-Khagun Bay, 16 – Shida Bay, 17 – Ulirba Cape, 18 – Khuzhir-Nugai Bay, 19 – Sarma, 20 – Mukhor Bay, 21 – Irkutskaya guba Bay, 22 – Tutyarkhey Bay, 23 – Kharin-Irgi Bay, 24 – Khool Bay, 25 – Khytyrhey Bay, 26 и 27 – Zagli Bay, 28 – Khuzhir, 29 – Elokhin Cape, 30 – Severobaikalsk, 31 – Frolikha Bay, 32 – Ayaya Bay, 33 – Khakusy Bay, 34 – Monakhovo, 35 – Kurbulik, 36 – Zmeinaya Bay, 37 – Peshcherka Bay (Ushkany Islands), 38 – Maksimikha, 39 – Turka, 40 – N. Enkhaluk, 41 – Posol'skiy sor, 42 – Babushkin, 43 – Tankhoi, 44 – Vydrino, 45 – Baikalsk, 46 – Slyudyanka, 47 – Kultuk. *Thermal springs stations:* 1 – Khakusy, 2 – Zmeinyy.

antibiotic-resistant strains into environmental objects maintains the pool of resistant strains due to the transfer of resistance genes among autochthonous bacterial communities in the ecosystem. The transfer of antibiotic resistance genes into communities has received worldwide attention. The spread of such genes among bacteria is known to increase morbidity and mortality from the infections they cause. If there are additional factors contributing to the persistence and multiplication of PPB and if there are no community treatment facilities, the self-cleaning capacity of the lake coastal waters may be reduced to such an extent that their use becomes epidemiologically unsafe. This requires the development of a water quality management strategy for Lake Baikal.

Acknowledgements

The study was carried out within the State Task No. 0279-2021-0015 (121032300269-9).

Conflict of interest

The authors declare that they have no competing interests.

References

- Belykh O.I., Gladkikh A.S., Sorokovikova E.G. et al. 2013. Microcystine-Producing Cyanobacteria in Water Reservoirs of Russia, Belarus and Ukraine. *Chemistry for Sustainable Development* 21: 347-361
- Belykh O.I., Gladkikh A.S., Sorokovikova E.G. et al. 2015. Identification of Toxic Cyanobacteria in Lake Baikal. *Doklady Biochemistry and Biophysics*. 463: 220-224 DOI: [10.1134/S1607672915040067](https://doi.org/10.1134/S1607672915040067)
- Belykh O.I., Fedorova G.A., Kuzmin A.V. et al. 2017. Microcystins in Cyanobacterial Biofilms from the Littoral Zone of Lake Baikal. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*. 72(4): 225-231
- Drucker V.V., Kostornova T.Ya., Molozhavaya O.A. et al. 1993. Water quality assessment of Lake Baikal by sanitary-bacteriological indicators. *Geography and Natural Resources* 1: 60-64. (in Russian)
- Drucker V.V., Maslenikov A.A. 1998. Microbiological monitoring of Lake Baikal tributaries. In: *International. Symposium, Environmental control and rehabilitation*. (in Russian)
- Drucker V.V., Panasyuk E.Yu. 2002. Potentially pathogenic bacteria - indicators of Baikal water quality. In: *Assessment of the current state of microbiological research in the Eastern Siberian region*, pp. 140. (in Russian)
- Drucker V.V., Panasyuk E.Yu. 2006. Potentially pathogenic bacteria in a microbial community of Lake Baikal. *Hydrobiologia* 568: 267-271. DOI [10.1007/s10750-006-0304-z](https://doi.org/10.1007/s10750-006-0304-z)
- Drucker V.V., Shtykova Y.R., Suslova M.Yu. et al. 2022. Microbiological monitoring. In: *Takhteev V.V. (Ed.), Ecological monitoring of Lake Baikal*. Irkutsk, pp. 32-49. (in Russian)
- Egorova A.A., Deryugina Z.P., Kuznetsov S.I. 1952. Characteristic of saprophytic microflora of water in a number of lakes of various trophic degrees. *Trudy Baikalskoi limnologicheskoi stantsii AN SSSR [Proceedings of the Baikal Limnological Station of the Academy of Sciences of the USSR]* 2: 118-127. (in Russian)
- Goman G.A. 1973. Influence of the waste water of the Baikal pulp mill on the microbiological processes in the water and sediments of Southern Baikal. *Cand. Sc. Dissertation*, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia. (in Russian)
- Kravchenko O.S. 2009. Bacteria of the genus *Enterococcus* in Lake Baikal: distribution, species composition and adaptation mechanism. *Cand. Sc. Dissertation*, Buryat State University, Ulan-Ude, Russia. (in Russian)
- Kriss A.E., Chebotarev E.I. 1970. Vertical distribution of heterotrophic bacteria in the open deep water of Lake Baikal. *Microbiologia* 39(1): 146-148. (in Russian)
- Kuznetsov S.I. 1951. Comparative characteristics of the biomass of bacteria and phytoplankton in the surface water layer of the Central Baikal. *Trudy Baikalskoi limnologicheskoi stantsii AN SSSR [Proceedings of the Baikal Limnological Station of the Academy of Sciences of the USSR]* 13: 217-225. (in Russian)
- Kuznetsov S.I. 1957. Microbiological characteristics of water and soils of Baikal. *Trudy Baikalskoi limnologicheskoi stantsii AN SSSR [Proceedings of the Baikal Limnological Station of the Academy of Sciences of the USSR]* 15: 388-396. (in Russian)
- Maksimova E.A., Maksimov V.N. 1989. *Microbiology of Baikal waters*. Irkutsk: Publishing House of the Irkutsk State University. (in Russian)
- Messineva M.A. 1957. Biogeochemical studies of Baikal deep-water stantsii AN SSSR [Proceedings of the Baikal Limnological Station of the Academy of Sciences of the USSR] 15: 199-211. (in Russian)
- MUK 4.2.1884-04. Sanitarno-mikrobiologicheskii i sanitarno-parazitologicheskii analiz vody poverhnostnykh vodnykh ob'yektov [Sanitary-microbiological and sanitary-parasitological analysis of water in surface water bodies] (in Russian)
- Namsaraev V.V., Dulov L.E., Zemskaya T.I., et al. 1995. Anthropogenic activation of bacterial production in bottom sediments of Lake Baikal. *Microbiologia* 64(4): 548-552.
- Nechaeva N.B., Salimovskaya-Rodina A.G. 1935. Micro-biological analysis of Baikal bottom sediments. *Trudy Baikalskoi limnologicheskoi stantsii AN SSSR [Proceedings of the Baikal Limnological Station of the Academy of Sciences of the USSR]* 6: 5-14. (in Russian)
- Panasyuk E.Yu., Drucker V.V. 2002. Dominant species of potentially pathogenic bacteria isolated from Lake Baikal water. In: *Assessment of the current state of microbiological research in the Eastern Siberian region*, pp. 64. (in Russian)
- Podlesnaya G.V., Galachyants A.D., Shtykova Yu.R. et al. 2022. Sanitary-microbiological assessment of the water quality in the Listvenichnyi Bay at the period of extremely high water level in Lake Baikal. *Geography and Natural Resources* 43(5): 163-169. DOI: [10.15372/GIPR20220517](https://doi.org/10.15372/GIPR20220517)
- Potapov S., Gorshkova A., Krasnopeev A. et al. 2023. RNA-Seq Virus Fraction in Lake Baikal and Treated Wastewaters. *International Journal of Molecular Sciences* 24: 1-26. DOI: [10.3390/ijms241512049](https://doi.org/10.3390/ijms241512049)
- Rodina A.G. 1954. Bacteria in the productivity of the rocky littoral zone of Lake Baikal. In: *Problems of Inland Waters Hydrobiology in USSR*, pp. 172-201. (in Russian)
- Romanova A.P. 1958. Seasonal dynamics of bacterioplankton, its horizontal and vertical distribution in the southern part of Lake Baikal. *Izvestiya SO AN SSSR [Bulletin of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences]* 7: 28-35. (in Russian)
- SanPiN 1.2.3685-21. *Gigienicheskiye normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya [Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness to humans of environmental factors]* (in Russian)
- Suslova M.Yu., Pestunova O.S., Parfenova V.V. 2017. *Water Quality Assessment in the Selenga River and its Delta*

in Terms of Sanitary AND Microbiological Indices. *Hydrobiological Journal* 53(3):70-81. DOI: [10.1615/HydrobJ.v53.i3.70](https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v53.i3.70)

Shchetinina E.V., Maksimov V.V., Kraikovskaya O.V., et al. 2013. Assessing the State of Water Masses of the Southern Baikal in the Zone of Influence of Baikal PPM by Many-Year Microbiological Characteristics. *Water Resources*. 40(6): 649-656. DOI: [10.7868/S0321059613060114](https://doi.org/10.7868/S0321059613060114)

Shtykova Yu.R., Gladkikh A.S., Mironova L.V. et al. 2018a. Maldi-tof-ms analysis in accelerated identification of opportunistic bacteria in different ecotopes of the coastal zone of Lake Baikal. In: International Conference "Freshwater Ecosystems – Key Problems", p. 314.

Shtykova Y.R., Drucker V.V., Sorokovikova E.G. et al. 2018b. Sanitary-microbiological and toxicological monitoring of Lake Baikal. Part 1: water area of the Maloe more in 2016. *Environmental control systems* 11(31): 110-114. DOI: [10.33075/2220-5861-2018-1-110-114](https://doi.org/10.33075/2220-5861-2018-1-110-114) (in Russian)

Shtykova Y.R., Suslova M.Yu., Kostornova T.Ya. et al. 2016. Sanitary and Microbiological Monitoring in the Lake Baikal Pelagic Zone and Baikal's Major Tributaries from 2010 through 2015. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series "Biology. Ecology"*. 17:71-62. (in Russian)

Shtykova Yu.R., Suslova M.Yu., Podlesnaya G.V. et al. 2020. Antibiotic-resistant opportunistic bacteria in the coastal

zone of Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology*. 4: 1026-1027. DOI: [10.31951/2658-3518-2020-A-4-1026](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-1026)

Tikhonova I.V. 2006. Morphological and genetic features of picoplanktonic cyanobacteria of Lake Baikal. Cand. Sc. Dissertation, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia. (in Russian)

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? *J. Great Lakes Res.* 42(3): 487-497. DOI: [10.1016/j.jglr.2016.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011)

Vinogradova T.P., Kerber E.V., Drucker V.V., et al. 2004. Microbiological heritage of the 20th century. Part 1. Results of the Study of the Baikal-Angaro-Yenisei Ecosystem. Irkutsk: Izd-vo Inst-ta Geografiya SB RAS. (in Russian)

Yasnitsky V.A., Blankov B.N., Gortikov V.I. 1927. Report on the work of the Baikal limnological station. *Izvestiya Biol.-geogr. Institut at ISU* 3(3): 47-54. (in Russian)

Zemskaya T.I., Namsaraev B.B., Parfenova V.V., et al. 1997. Microorganisms in Bottom Sediments of Lake Baikal and Environmental Conditions. *Russian Journal of Ecology*. 28(1): 36-40.

Санитарно-бактериологический мониторинг качества воды озера Байкал: от единичных/разовых исследований до систематических ежегодных экспедиций

Дрюккер В.В., Суслова М.Ю., Небесных Ю.Р., Потапов С.А.,
Подлесная Г.В.*, Белых О.И.

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

АННОТАЦИЯ. Проведён анализ санитарно-бактериологической оценки качества воды литорали и пелагиали озера Байкал за весь период микробиологических исследований экосистемы. Установлено, что подобные исследования в прошлом веке были единичными и только с конца его они стали проводиться по всему озеру, а в настоящее время исследования проводятся ежегодно в весенний, летний и осенний периоды по всей акватории Байкала и в устьевых участках крупных притоков. Оценено качество вод озера, установлены неблагополучные районы в литоральной части по превышению нормативов СанПиН. В 2021-2023 гг. отобраны пробы сточных вод после прохождения очистных сооружений в гг. Слюдянке и Северобайкальске, установлена низкая эффективность обеззараживания и поступление условно-патогенных и патогенных бактерий в Байкал (бактериальное загрязнение). Предложена схема и периодичность проведения санитарно-бактериологического мониторинга экосистемы оз. Байкал.

Ключевые слова: озеро Байкал, санитарно-показательные бактерии, качество воды, схема санитарно-бактериологического мониторинга

1. Введение

Поверхностные воды нашей планеты: озера, водохранилища, реки, также как моря и океаны, подвергаются постоянному антропогенному воздействию. Не избежала этого влияния и экосистема озера Байкал, включенная в 1996 г. в Список объектов всемирного природного наследия ЮНЕСКО в силу своей уникальности и чистоты вод. Во всем мире наблюдается ухудшение экологического состояния пресных водоемов – основных источников питьевой воды, что приводит к нарушению эволюционно сложившихся микробиоценозов и развитию в них условно-патогенных и патогенных бактерий. Благодаря необычной конкурентоспособности, выработанной за 3 млрд. лет существования, микроорганизмы могут поселяться во всех экологических нишах – от полярных регионов до пустынь. Вода – одна из наиболее благоприятных сред обитания для них, в водных экосистемах микроорганизмы достигают высокой численности, являясь определяющими и необходимыми звеньями круговорота химических элементов, обеспечивая процесс

непрерывного создания и деструкции органических веществ в результате взаимосвязанного функционирования.

Микробиологические исследования воды и грунтов Байкала проводятся уже около 100 лет (Яснитский и др., 1927; Нечаева и Салимовская-Родина, 1935; Кузнецов, 1951; Романова, 1958; и др.). В последующие годы были изучены численность и биомасса бактериопланктона не только в южной части озера, но и по всей акватории Байкала, их межгодовая динамика и вертикальное распределение, установлены пики в сезонном развитии, связи с динамикой численности и составом фитопланктона, с изменениями температуры воды, определено время генерации бактерий, начата работа по идентификации видового состава культивируемых микробных сообществ (Кузнецов, 1957; Егорова и др., 1952; Родина, 1954; Крисс и Чеботарев, 1970). В этот период становления микробиологии на Байкале главную роль сыграли специалисты-микробиологи из научно-исследовательских учреждений гг. Москвы и Ленинграда, используя свои знания и опыт.

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: podlesnaya@lin.irk.ru (Г.В. Подлесная)

Поступила: 19 октября 2023; **Принята:** 03 ноября 2023;
Опубликована online: 10 ноября 2023

© Автор(ы) 2023. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



Санитарно-бактериологическая оценка качества воды подразумевает определение совокупности санитарных показателей – критериев, отражающих санитарное состояние исследуемого водного объекта в соответствии с требованиями нормативных документов. Санитарными показателями служат фекальные индикаторные бактерии (ФИБ). Они используются во всем мире для выявления и предупреждения фекального загрязнения и связанного с ним риска для здоровья человека в связи с вероятным присутствием патогенных бактерий и вирусов. ФИБ включают такие группы бактерий, как общие колиформные бактерии (ОКБ), термотолерантные колиформные бактерии (ТКБ), фекальные колиформные бактерии (fecal coliforms), *E. coli*, *энтерококки*, *Bifidobacterium*, *Bacteroides*, *Clostridium* spp., которые широко распространены в фекалиях людей и большинства животных. Их уровни в сточных водах и фекалиях сравнительно высоки, поэтому они обычно обнаруживаются при наличии фекального загрязнения в поверхностных водах. Поэтому поверхностные воды контролируются с использованием численности ФИБ, для которых установлены нормативы законодательными документами для оценки качества используемых вод. На озере Байкал подобные исследования качества воды были начаты значительно позже.

2. Материалы и методы

После реорганизации в 1961 г. Байкальской лимнологической станции в Лимнологический институт СО АН СССР и создания в 1972 году «лаборатории прикладной микробиологии», которую возглавила к.б.н. М.А. Мессинева, еще в 50-е годы исследовавшая на Байкале микроорганизмы грунтов озера (Мессинева, 1957), исследования микроорганизмов оз. Байкал стали плановыми, систематическими и комплексными. Поскольку цель нашей работы – анализ проведенных исследований по санитарно-бактериологическому мониторингу качества воды оз. Байкал за предыдущий период работ и разработка схемы его для уникального олиготрофного водоема, мы не приводим список всех микробиологических работ, так как он имеется на сайте Лимнологического института СО РАН, а также в монографии-сводке микробиологических исследований водоемов и водотоков Байкало-Ангара-Енисейской гидросистемы (Виноградова и др., 2004).

Правительство РФ в 2023 г. утвердило новое Постановление N 260 «Положение о государственном экологическом мониторинге уникальной экологической системы озера Байкал», в котором установило порядок осуществления его, где в п. 8 «д» и 11 «е» обязало предоставлять информацию «федеральным государственным бюджетным учреждением «Сибирское отделение Российской академии наук» в части результатов наблюдений за состоянием озера Байкал». Для оценки проведенных ранее объемов и частоты исследований по санитарно-бактериологическому мониторингу экосистемы Байкала,

а также для обсуждения использования в настоящее время конкретных стандартных и новых показателей, методов исследований, станций отбора проб воды, времён года и частоты отбора их, что необходимо для разработки и внедрения в практику схемы самого микробиологического мониторинга, мы проанализировали имеющийся опубликованный массив санитарно-бактериологических исследований озера.

3. Результаты и обсуждение

Анализ результатов проведенных санитарно-бактериологических исследований Байкала показал, что в этом научном направлении единичные работы начались в связи со строительством Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) только в конце 60-х годов прошлого столетия. Впервые описание микробных сообществ воды и загрязненного грунта в районе влияния сточных вод БЦБК дано в 1970-1973 гг. в работах Г.А. Гомана (1973). Впоследствии в этом районе выполнены работы по оценке численности анаэробных сапрофитов, сульфатредукторов, метаногенов, установлены скорости разложения белка, целлюлозы, сульфатредукции, образования метана, сделан прогноз об ухудшении экологической обстановки при дальнейшем сбросе сточных вод (Намсараев и др., 1995; Земская и др., 1997).

Качество воды Южного Байкала и, главным образом, у пос. Бол. Коты и у г. Байкальска исследовали в этот период научные сотрудники НИИ Биологии Иркутского государственного университета (Максимова и Максимов, 1989). Многолетние результаты исследований этих авторов показали стабильные различия качества байкальской воды во все периоды: на станции «1 км от берега» пос. Бол. Коты, удаленной от промышленных и сельскохозяйственных зон, качество воды на всех глубинах оставалось высоким, в то время как у г. Байкальска в радиусе до 10 км на всех глубинах вода не соответствовала стандартам на питьевую воду, рекреационную и рыбо-хозяйственную деятельность.

Оценку качества вод всего Байкала в литоральной его части и в пелагиали до максимальных глубин по санитарно-бактериологическим показателям начали исследовать и дали в 1993 г. научные сотрудники Лимнологического института СО РАН В.В. Дрюккер, Т.Я. Косторнова, О.А. Моложавая, В.А. Афанасьев (1993). Было установлено, что пелагиаль озера имеет высокое качество воды как на поверхности, так и на всех глубинах. Прибрежные же воды у всех населенных пунктов имеют низкое качество, во многих пробах была обнаружена *E. coli*. Одновременно стал проводиться и микробиологический мониторинг крупных притоков оз. Байкал, который показал низкое качество воды в устьевых участках рр. Селенга, Баргузин, Бол. Голоустная, Турка, Тья, Переменная, Похабиха, поступающей в озеро в весенний период (Дрюккер и Масленников, 1998).

В 1997-2000 гг. сотрудниками лаборатории водной микробиологии ЛИН СО РАН были впер-

вые целенаправленно проведены многолетние исследования в различные сезоны года по выяснению масштаба распространения и идентификации условно-патогенных бактерий в воде озера Байкал по всей его акватории (Дрюккер и Панасюк, 2002; Панасюк и Дрюккер, 2002). Пробы воды начали отбирать по стандартным гидрологическим разрезам на центральных глубинных станциях по различным горизонтам и на прибрежных станциях у западного и восточного берегов: 1. п. Маритуй – п. Солзан; 2. п. Листвянка – п. Танхой; 3. м. Кадильный – п. Мишиха; 4. пр. Харауз – м. Красный Яр; 5. р. Анга – р. Сухая; 6. р. Болдакова – прол. Ольхонские ворота; 7. м. Ухан – м. Тонкий; 8. м. Покойники – м. Ушканий; 9. м. Елохин – п. Давша; 10. м. Котельниковский – м. Амнундакан; 11. с. Байкальское – м. Турали; 12. м. Заворотный – р. Сосновка; 13. м. Крестовый – м. Хобой; 14. р. Тья – р. Немнянка.

В результате проведенных исследований в литоральной зоне озера было выделено 898 штаммов потенциально-патогенных бактерий (ППБ), являющихся представителями 31 вида, относящихся к семейству *Enterobacteriaceae* и неферментирующей группе бактерий. Количество изученных бактерий закономерно повышалось в воде в летне-осенний период и уменьшалось в зимние месяцы. Распределение условно-патогенных бактерий по всей акватории озера было неравномерное - закономерно отмечалось значительное повышение их численности в местах сброса неочищенных стоков разнообразного происхождения. Наибольшая численность и видовое разнообразие этой группы бактерий установлены в воде Южного Байкала: пос. Листвянка, порт Байкал, г. Байкальск; в Среднем Байкале – Баргузинский и Чивыркуйский заливы, дельта р. Селенги, Малое море; в Северном Байкале – участок Байкало-Амурской магистрали. В пелагиали озера изученная группа бактерий не обнаружена по всей толще воды на различных участках (более 30-ти станций). Доминирующими видами условно-патогенных бактерий, выделенными из вод литоральной части озера, были: *Pseudomonas aeruginosa*, *Enterobacter cloacae*, *Citrobacter freundii*, *Burkholderia cepacia*. Условно-патогенные бактерии, выделенные из вод оз. Байкал, обладают множественной антибиотикорезистентностью, гемолитической активностью к эритроцитам человека, способностью к культивированию при 37° С и, следовательно, несут потенциальную эпидемиологическую опасность для здоровья населения (Drucker and Panasyuk, 2006). Авторами было предложено дополнительно использовать для санитарно-бактериологического контроля качества вод Байкала обнаруженные потенциально-патогенные бактерии, а также бактерии рода *Enterococcus*: *E. faecium*, *E. avium*, *E. faecalis*, *E. mundtii*, *E. hirae*, *E. durans*, *E. gallinarum*, как специфические индикаторы поступления в озеро фекальных (неочищенных) вод. Многолетними исследованиями было установлено, что основными источниками загрязнения вод Байкала являются неочищенные хозяйственно-бытовые сточные воды населенных пунктов, расположенных на берегах озера, сельскохозяйственных

предприятий, туристических комплексов, которые не имеют систем обеззараживания, утилизации и вывоза сточных вод, а также увеличивающаяся численность туристических катеров, которые не имеют емкостей для сбора бытовых и подсланевых вод.

В 2000-2009 гг. наблюдалась тенденция к увеличению санитарно-бактериологических показателей в воде в районе сброса «обеззараженных» сточных вод Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (Щетинина и др., 2013). В связи с ухудшением санитарной обстановки авторами работы были проведены исследования по изучению разнообразия и антибиотикоустойчивости бактерий, выделенных из воды, в наиболее подверженных антропогенному влиянию районах озера. Другие авторы также обнаруживали в воде различных районов Байкала представителей санитарно-бактериологического загрязнения – бактерий рода *Enterococcus* (Кравченко, 2009).

Наряду с этими микроорганизмами, впервые в России в воде озера Байкал в этот же период были обнаружены токсичные цианобактерии, опасные для человека, у которых с использованием современных методов исследования были изучены разные типы и варианты токсинов, а также гены их синтеза (Тихонова, 2006; Белых и др., 2013; Белых и др., 2015). Для санитарно-бактериологического мониторинга качества воды в Байкале этот новый аспект очень существенен, так как цианобактериальные цветения в настоящее время являются самым значимым и характерным следствием эвтрофирования водных объектов во всем мире, а оно уже происходит в разных частях Байкала. Определены концентрации микроцистинов и сакситоксинов в пробах планктона и бентоса озера и оценена степень угрозы токсичных цианобактерий здоровью человека и животных. Показано, что «цветения» бентосных цианобактерий с наличием токсинопродуцирующих видов, начавшиеся на оз. Байкал в 2011 г., сейчас приняли характер экологического кризиса, и возможно, стали причиной массовой гибели байкальских губок (Белых и др., 2017). Эти новые результаты исследований несомненно заслуживают соответствующей оценки для решения вопроса о включении этих бактерий в официальные документы по микробиологическому мониторингу качества вод Байкала.

В последние годы экосистема озера Байкал претерпевает серьезные экологические изменения. В прибрежных участках некоторых районов наблюдаются признаки эвтрофикации – интенсивное развитие неспецифических для литорали озера водорослей, отмечены массовая гибель губок и цветение токсичных цианобактерий (Timoshkin et al., 2016). Растут объемы сброса в озеро некачественно очищенных и не очищенных сточных вод из населенных пунктов, увеличивается рекреационная нагрузка, резко возросло количество туристических судов, не оборудованных емкостями для сбора хозяйственно-бытовых и подсланевых вод. Численность туристов, приезжающих на Байкал во все сезоны года, выросла многократно. Так, в 2019 г. их число дости-

гало 2.2 млн. Непосредственно на побережье озера сложилось более 40 зон рекреационного освоения, в которых сосредоточена основная часть объектов размещения туристов: турбазы, гостиницы, дома отдыха. Возникают вопросы: как эффективно работают септики в зонах отдыха туристов, не нанося ущерб экосистеме Байкала? Как часто «Росприроднадзор» проверяет утилизацию хозяйственно-бытовых и подсланевых вод на туристических теплоходах?

Начиная с начала 2000 г. в Лимнологическом институте СО РАН сложилась практика проведения комплексных экспедиций по всему Байкалу, в которых постоянно участвуют микробиологи. Конечно, экспедиционные работы по всему Байкалу проводились и раньше, но комплексность исследований ограничивалась отсутствием необходимых приборов для одновременного отбора большого количества проб воды и грунта, быстрого измерения абиотических параметров до максимальных глубин и др. В настоящее время только Лимнологический институт имеет на Байкале научно-исследовательский флот, оборудованный необходимыми приборами для проведения научных лимнологических исследований. По этой причине санитарно-бактериологический мониторинг качества вод Байкала и его притоков проводится сотрудниками лаборатории водной микробиологии института, которые имеют всё необходимое современное оборудование, отдельные помещения для проведения санитарно-бактериологического мониторинга качества воды оз. Байкал классическими и современными молекулярно-биологическими методами. Лаборатория водной микробиологии аккредитована в национальной системе Росаккредитации (№ RA.RU.21ЛИ02).

Санитарно-бактериологический мониторинг качества вод Байкала, проведенный в период 2010-2023 гг. в ежегодных весенних (вторая половина мая-начало июня), летних (август) и осенних (вто-

рая половина сентября) кругобайкальских экспедициях показал, что ФИБ постоянно присутствуют в прибрежной части озера. В литорали озера значительное количество колиформных бактерий и энтерококков было детектировано в южной части озера: пос. Листвянка, г. Байкальск, пос. Култук; в средней котловине: в акватории проливов Малое море, Ольхонские ворота, дельта р. Селенги; в северной части: г. Северобайкальск, пос. Заречный, (Штыкова и др., 2016, 2018б; Суслова и др., 2017; Подлесная и др., 2022). В 2011 г. превышение регламентируемых качество вод стандартов РФ наблюдали по всей пелагиали оз. Байкал, а также в большинстве его крупных притоков. В 2012 и 2015 гг. превышение санитарно-бактериологических показателей пелагических вод отмечено только в южной части озера (Рис. 1). В сентябре 2016 г. зафиксирована максимальная доля проб воды с низким коэффициентом самоочищения как в пелагиали – 60%, так и в устьях рек – 62.5%.

В водах устьев впадающих в озеро рек численность санитарно-показательных групп бактерий в 2010-2020 гг. (Рис. 2) в среднем была на порядок выше, чем их содержание в пелагиали: рр. Голоустная, Бугульдейка, Турка, Анга, Баргузин, Сухая, дельта Селенги (Дрюккер и др., 2022). Наиболее неблагоприятный период по качеству вод установлен в августе 2011 г., мае – июне 2012 г., когда количество нестандартных проб воды было максимальным. В августе 2010 г., мае – июне 2014 г. и сентябре 2017 г. все взятые речные пробы соответствовали «удовлетворительным» показателям качества поверхностных вод.

В 2022-2023 гг. кроме стандартных исследований по санитарно-бактериологическому мониторингу, нами были апробированы дополнительные методы: выявление фекального загрязнения с помощью маркерных зондов к бактериям (обитателям кишечника человека и животных), а также на установление вирусных сообществ в воде. Кроме того, в

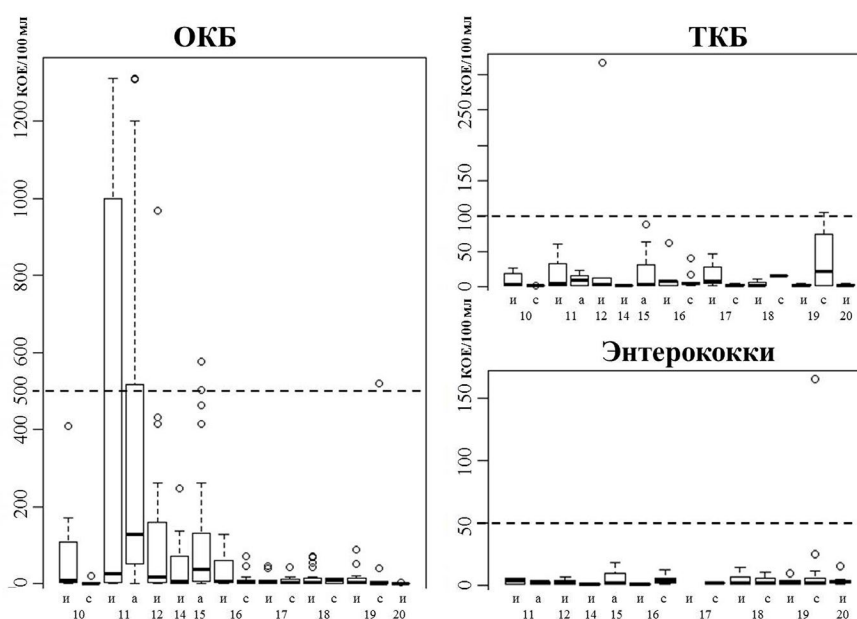


Рис.1. Численность санитарно-микробиологических показателей в пелагиали оз. Байкал по данным 2010-2020 гг. (и-июнь, а-август, с-сентябрь). Пунктирная линия – норматив.

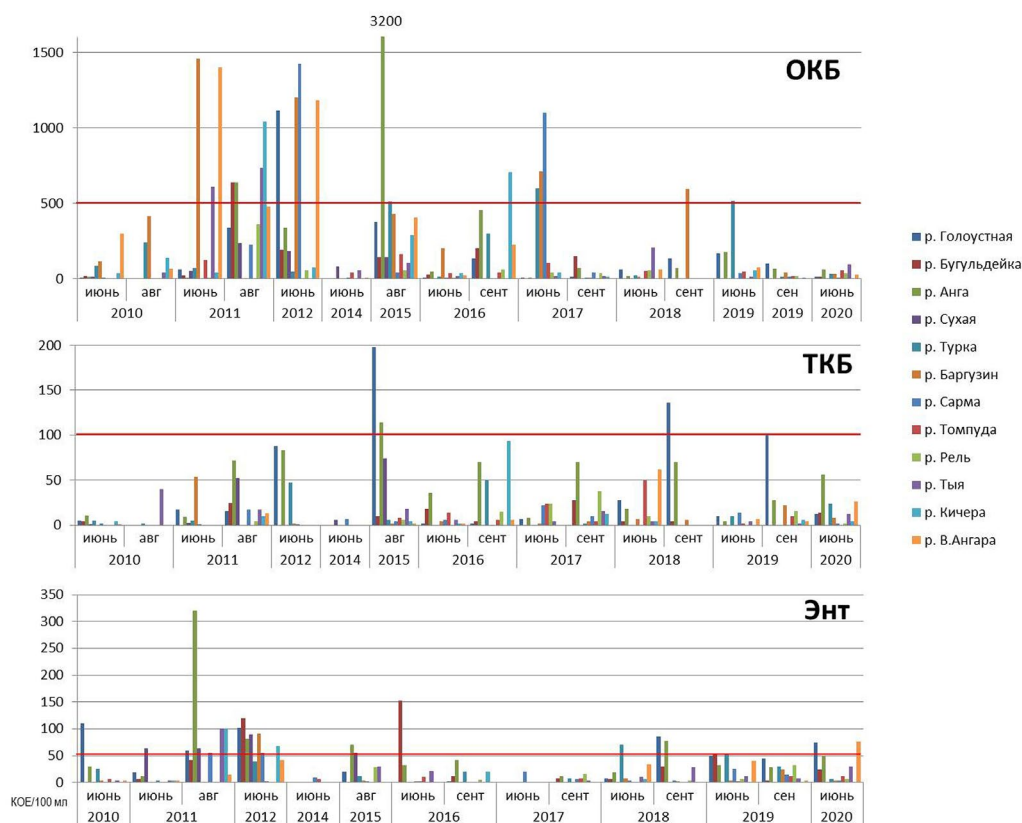


Рис.2. Численность санитарно-микробиологических показателей в водах притоков по данным 2010-2020 гг. Красная линия – норматив.

2021 г. в сетку станций отбора проб были включены сточные очищенные воды из очистных сооружений гг. Слюдянка и Северобайкальск, анализ которых проводили по СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». Также были отобраны 10 образцов грунта в прибрежной зоне на различных участках.

В оба года последних исследований на 55 (170 проб воды) и 59 (71 проба воды) станциях по основным санитарно-бактериологическим показателям результаты указывают на значительные превышения нормативов СанПиН. Так в 2023 г. это районы: гг. Байкальск, Бабушкин, пос. Листвянка, Танхой и Б. Голоустное, Посольский сор, бух. Песчаная и Ая, заливы Малого моря: Базарная, Куркутская, Мандархан, Шида, Хужирский, Чивыркуйский залив: Курбулик, Монахово, Арангатуи. Наибольшие превышения значений этих бактерий детектированы в: г. Бабушкин (*E. coli* в 1.7 раза, энтерококки в 20 раз), пос. Листвянка (*E. coli* в 4 раза, энтерококки в 4.7 раза), в Чивыркуйском заливе (*E. coli* в 5.2 раза, энтерококки в 6.4 раза), в Малом море (энтерококки в 4-6 раз). Шесть из семи притоков: рр. Переёмная, Снежная, Солзан, Горячий ключ также имели превышающие значения, особенно – рр. Похабиха (ОКБ в 11 раз, *E. coli* в 58 раз, энтерококков в 186 раз) и Медлянка (ОКБ в 1.2 раза, *E. coli* в 5 раз, энтерококков в 63 раза).

Сточные очищенные воды КОС г. Слюдянка по результатам анализов не соответствуют требованиям СанПиН 1.2.3685-21 и превышали показатели: ОКБ в 4200 раз, *E. coli* в 17000 раз, энтерококки в

3600 раз, что указывает на отсутствие этапов обеззараживания. Подобные результаты были получены нами и по сточным очищенным сточным водам КОС г. Северобайкальска в 2022 г. Исследования 10 проб прибрежного песчаного грунта из различных районов Байкала характеризовались различной степенью зараженности санитарно-показательными бактериями и позволили классифицировать эти районы по степени эпидемиологической опасности на три группы:

1. чрезвычайно опасная – г. Слюдянка;
2. опасная – пп. Култук, Максимиха, Курбулик, Сахюрта, бухты Ая и Змеиная;
3. умеренно опасная – г. Байкальск, пп. Хужир, Б. Коты.

Изучение поверхностной воды в пелагической зоне Байкала как в предыдущие годы, так и в этот период, полностью соответствуют нормативам СанПиН 1.2.3685-21 и МУК 4.2.1884-04 «Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов», за единичными исключениями проб на численность ОКБ в 2011-2012, 2015, 2019, 2021-2022 гг.

Создана коллекция из 172 культивируемых условно-патогенных штаммов бактерий, выделенных из планктона и эпилитона оз. Байкал, из очищенных сточных вод и прибрежных грунтов озера. С помощью современных методов идентификации (молекулярно-генетический и масс-спектрометрический анализы) исследовали 62 штамма, выделенных из придонных и поверхностных проб воды

(Штыкова и др., 2018a; Shtykova et al., 2020). Всего этим методом идентифицировано 18 родов и 21 вид условно-патогенных бактерий. Среди них представители порядка Enterobacterales рода *Yersinia*, *Citrobacter*, *Escherichia*, *Hafnia*, *Leclercia*, *Enterobacter*, *Lelliottia*, *Shigella*, порядка Pseudomonadales рода *Pseudomonas*, *Acitrobacter*, порядка Bacillales рода *Bacillus*, *Exiguobacterium* и *Staphylococcus*, семейства Aeromonadaceae род *Aeromonas*, семейства Enterococcaceae род *Enterococcus*, семейства Aerococcaceae род *Aerococcus*, семейства Comamonadaceae род *Delftia* и семейства Xanthomonadaceae род *Stenotrophomonas*.

Опасные для здоровья человека и животных виды условно-патогенных бактерий выделены из разных мест литоральной зоны оз. Байкал. Так, бактерии рода *Aeromonas* – самые распространенные, обнаружены в Малом море в бух. Базарная, в зал. Хужир-Нагайский, в зал. Хул, у пос. Хужир, пос. Листвянка, пос. Б. Коты, пос. Б. Голоустное, в бух. Ая. Во многих заливах Малого моря встречаются бактерии рода *Enterococcus*. Штаммы *E. coli* выделены в разных акваториях озера: в зал. Мухор и Хул, у пос. Б. Коты, в районе Ушканьих островов. Мы учитывали, что с 2022 г. согласно новым изменениям в СанПиН 1.2.3685-21, бактерия *E. coli* и энтерококки являются обязательными показателями при санитарно-микробиологической оценке качества воды.

В 2021-2023 гг. были взяты пробы сточных вод после прохождения очистных сооружений в гг. Слюдянке и Северобайкальске, установлена низ-

кая эффективность обеззараживания и поступление условно-патогенных и патогенных бактерий в Байкал (Potapov et al., 2023). Проведенные исследования чувствительности к антибиотическим веществам у 70 штаммов бактерий, выделенных из воды и у 17 штаммов – из очищенных сточных вод КОС г. Слюдянки, показали антибиотикорезистентность ко всем испытуемым антибиотическим веществам широкого спектра действия, используемых для лечения инфекционных заболеваний (пенициллины, цефалоспорины, карбапенемы, макролиды, аминогликозиды, тетрациклины нитрофураны и др.).

4. Заключение

Анализ результатов санитарно-бактериологического мониторинга за предыдущий и настоящий век достоверно указывают на снижение качества воды в прибрежной части Байкала, а также в притоках южной котловины его: увеличилось количество ОКБ, ТКБ и энтерококков, превышающее требования СанПиН 1.2.3685-21. В глубоководной части озера отмечен восходящий тренд численности энтерококков за последнее десятилетие. Полученные результаты указывают на поступление в реки и само озеро неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод. Канализационные очистные сооружения гг. Слюдянка и Северобайкальск в исследованный период работали неэффективно, как показали данные санитарно-микробиологических

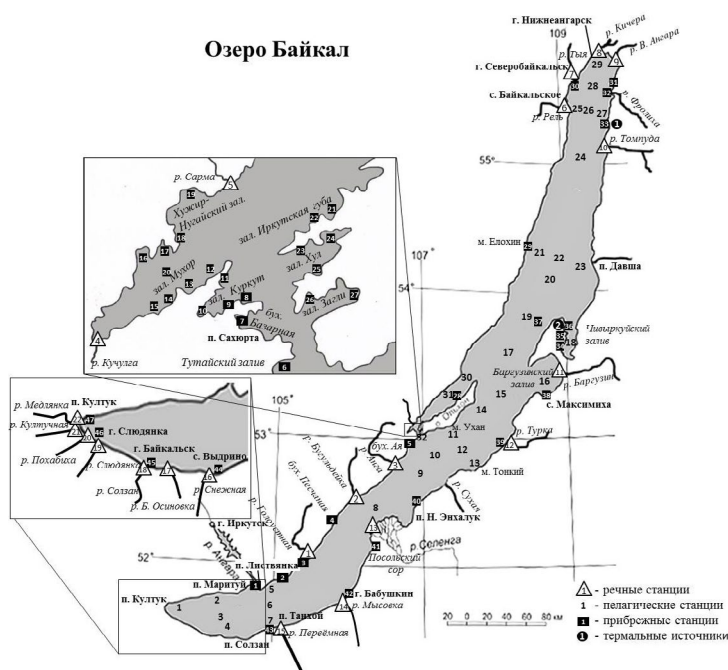


Рис.3. Схема санитарно-бактериологического мониторинга озера Байкал. Речные станции: 1 – Голоустная, 2 – Бугульдейка, 3 – Анга, 4 – Кучулга, 5 – Сарма, 6 – Рель, 7 – Тья, 8 – Кичера, 9 – В. Ангара, 10 – Томпуда, 11 – Баргузин, 12 – Турка, 13 – Селенга, 14 – Мысовка, 15 – Переменная, 16 – Снежная, 17 – Б. Осиновка, 18 – Солзан, 19 – Слюдянка, 20 – Похабиха, 21 – Култучная, 22 – Медлянка. Пелагические станции: 1 – 12 км от п. Култук, 2 – 3 км от п. Маритуй, 3 – п. Маритуй–п. Солзан, 4 – 3

км от п. Солзан, 5 – 3 км от п. Листвянка, 6 – п. Листвянка–п. Танхой, 7 – 3 км от п. Танхой, 8 – м. Красный Яр–прот. Харауз, 9 – р. Анга–р. Сухая, 10 – п. Болдакова – пр. Малые Ольхонские ворота, 11 – 3 км от м. Ухан, 12 – м. Ухан–м. Тонкий, 13 – 3 км от м. Тонкий, 14 – 7 км от м. Ижимей, 15 – м. Хобой–м. Крестовый, 16 – Баргузинский залив, 17 – Академический хребет, 18 – Чивыркуйский залив, 19 – ст. Солнечная–Ушканьи острова, 20 – м. Заворотный–р. Сосновка, 21 – 3 км от м. Елохин, 22 – м. Елохин–п. Давша, 23 – 3 км от п. Давша, 24 – м. Котельниковский–м. Амнундакан, 25 – 3 км от с. Байкальское, 26 – с. Байкальское–м. Турали, 27 – 3 км от м. Турали, 28 – р. Тья–р. Немнянка, 29 – 7 км от г. Нижнеангарск, 30 – м. Арал–м. Хобой, 31 – Пролив Малое Море, 32 – Малые Ольхонские ворота. Береговые станции: 1 – п. Листвянка, 2 – п. Б. Коты, 3 – п. Б. Голоустное, 4 – бух. Песчаная, 5 – бух. Ая, 6 – зал. Тутайский, 7 – бух. Базарная, 8 – бух. Щучья, 9 – бух. Радость, 10 – зал. Куркут, 11 – м. Бурлюк, 12 – бух. Чукотка, 13 – бух. Мандархан, 14 – зал. Зуун-Хагун, 15 – зал. Баруун-Хагун, 16 – бух. Шида, 17 – м. Улирба, 18 – зал. Хужир-Нугайский, 19 – д. Сарма, 20 – зал. Мухор, 21 – зал. Иркутская губа, 22 – бух. Тутырхей, 23 – бух. Харин-Ирги, 24 – зал. Хул, 25 – бух. Хытырхей, 26 и 27 – зал. Загли, 28 – п. Хужир, 29 – м. Елохин, 30 – г. Северобайкальск, 31 – бух. Фролиха, 32 – бух. Ая, 33 – бух. Хакусы, 34 – п. Монахово, 35 – п. Курбулик, 36 – бух. Змеиная, 37 – бух. Пещерка (Ушканьи острова), 38 – с. Максимиха, 39 – с. Турка, 40 – п. Н. Энхалук, 41 – Посольский сор, 42 – г. Бабушкин, 43 – п. Танхой, 44 – с. Выдрино, 45 – г. Байкальск, 46 – г. Слюдянка, 47 – п. Култук. Станции термальных источников: 1 – Хакусы, 2 – Змеиный.

анализов. Сточные воды из выпускных труб КОС не соответствовали требованиям СанПиН 1.2.3685-21, количество колиформных бактерий превышало нормативные значения. Создана коллекция из 172 культивируемых условно-патогенных бактерий, выделенных из воды оз. Байкал, из очищенных сточных вод и прибрежных грунтов озера.

В результате проведенного анализа многолетних исследований санитарно-показательных микроорганизмов на оз. Байкал, мы предлагаем «Схему санитарно-бактериологического мониторинга» (Рис. 3), по которой определение качества вод литоральной и пелагиальной частей необходимо проводить во все сезоны года: зимний (март), весенний (конец мая-начало июня), летний (август), осенний (конец сентября-начало октября). Для Байкала, содержащего 20% всей пресной воды на Земле, большое практическое значение в настоящее время глобального потепления и усиливающегося антропогенного (биологического и химического) воздействия имеет проблема сохранения воды высокого качества, регулярное проведение санитарно-бактериологического мониторинга будет оперативно и достоверно показывать тренды трофности его экосистемы.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы государственного задания № 0279-2021-0015 (121032300269-9).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Белых О.И., Гладких А.С., Сорокикова Е.Г. и др. 2013. Микроцистин-продуцирующие цианобактерии в водоемах России, Беларуси и Украины. *Химия в интересах устойчивого развития* 21: 363-378.

Белых О.И., Гладких А.С., Сорокикова Е.Г. и др. 2015. Идентификация токсичных цианобактерий в озере Байкал. *ДАН* 463: 353-357. DOI: [10.1134/S1607672915040067](https://doi.org/10.1134/S1607672915040067)

Белых О.И., Федорова Г.А., Кузьмин А.В. и др. 2017. Обнаружение микроцистинов в цианобактериальных обрастаниях различных субстратов прибрежной зоны озера Байкал. *Вестник Московского университета* 72(4): 262-269. DOI: [10.3103/S0096392517040022](https://doi.org/10.3103/S0096392517040022)

Виноградова Т.П., Кербер Е.В., Дрюккер В.В. и др. 2004. Микробиологическое наследие XX века. Часть 1. Итоги изучения Байкало-Ангара-Енисейской экосистемы. Иркутск: Изд-во Инст-та Географии СО РАН.

Гоман Г.А. 1973. Влияние сточных вод Байкальского целлюлозного завода на микробиологические процессы в воде и грунтах Южного Байкала. Автореф. дисс... канд. биол. наук. Иркутск, Россия.

Дрюккер В.В., Косторнова Т.Я., Моложавая О.А. и др. 1993. Оценка качества воды оз. Байкал по санитарно-бактериологическим показателям. *География и природные ресурсы* 1: 60-64.

Дрюккер В.В., Масленников А.А. 1998. Микробиологический мониторинг притоков оз. Байкал. *Междуна-*

родн. Симпозиум: Контроль и реабилитация окружающей среды: 88.

Дрюккер В.В., Панасюк Е.Ю. 2002. Потенциально-патогенные бактерии – индикаторы качества вод Байкала. Оценка современного состояния микробиологических исследований в Вост.- Сиб. регионе: 140.

Дрюккер В.В., Штыкова Ю.Р., Суслова М.Ю. и др. 2022. Микробиологический мониторинг. В: Тахтеев В.В. (ред.), *Экологический мониторинг озера Байкал*. Иркутск: Изд-во ИГУ: 32-49.

Егорова А.А., Дерюгина З.П., Кузнецов С.И. 1952. Характеристика сапрофитной микрофлоры воды ряда озер различной степени трофии. *Тр. Ин-та микробиологии* 2:118-127.

Земская Т.И., Намсараев Б.Б., Парфенова В.В. и др. 1997. Микроорганизмы донных осадков оз. Байкал и экологические условия среды. *Экология* 1: 40-44.

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

Крисс А.Е., Чеботарев Е.И. 1970. Вертикальное распределение гетеротрофных бактерий в открытых глубоководных районах озера Байкал. *Микробиология* 39(1): 146-148.

Кузнецов С.И. 1951. Сравнительная характеристика биомассы бактерий и фитопланктона в поверхностном слое воды Среднего Байкала. *Тр. Байкал. Лимнол. ст. АН СССР* 13: 217-225.

Кузнецов С.И. 1957. Микробиологическая характеристика вод и грунтов Байкала. *Тр. Байкальск. Лимнолог. ст. АН СССР* 15: 388-396.

Максимова Э.А., Максимов В.Н. 1989. Микробиология вод Байкала. Иркутск: Изд-во ИГУ.

Мессинева М.А. 1957. Биогеохимические исследования глубоководных осадков Байкала. *Тр. Байкальск. Лимнол. Ст. АН СССР* 15: 199-211.

МУК 4.2.1884-04. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов. Методические указания.

Намсараев Б.Б., Дулов Л.Е., Земская Т.И. и др. 1995. Антропогенная активация бактериальной деятельности в донных осадках озера Байкал. *Микробиология*. 64(4): 548-552.

Нечаева Н.Б., Салимовская-Родина А.Г. 1935. Микробиологический анализ донных отложений Байкала. *Тр. Байкал, лимнол. Ст. АН СССР* (6): 5-14.

Панасюк Е.Ю., Дрюккер В.В. 2002. Доминирующие виды потенциально-патогенных бактерий, выделенные из воды озера Байкал. В: Оценка современного состояния микробиологических исследований в Вост.- Сиб. регионе: 64.

Подлесная Г.В., Галачянц А.Д., Штыкова Ю.Р. и др. 2022. Санитарно-микробиологическая оценка качества вод залива Лиственничный в период экстремальной водности озера Байкал. *География и природные ресурсы* 43(5): 163-169. DOI: [10.15372/GIPR20220517](https://doi.org/10.15372/GIPR20220517)

Родина А.Г. 1954. Бактерии в продуктивности каменистой литорали озера Байкал. В: *Проблемы гидробиологии внутренних вод*. Л.: Изд-во АН СССР:172-201.

Романова А.П. 1958. Сезонная динамика бактериопланктона, его горизонтальное и вертикальное распределение в южной части Байкала. *Изв. СО АН СССР* 7: 28-35.

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. М.: Минздрав России.

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

но-микробиологическим показателям. Гидробиол. журнал 53(1): 74-84. DOI: [10.1615/HydrobJ.v53.i3.70](https://doi.org/10.1615/HydrobJ.v53.i3.70)

Тихонова И.В. 2006. Морфологические и генетические особенности пикопланктонных цианобактерий озера Байкал. Автореф. дисс... канд. биол. наук. Иркутск, Россия.

Штыкова Ю.Р., Гладких А.С., Миронова Л.В. и др. 2018а. Maldi-tof-ms анализ в ускоренной идентификации условно-патогенных бактерий в различных экотопях прибрежной зоны озера Байкал. В: Международная конференция «Пресноводные экосистемы – современные вызовы», стр. 314.

Штыкова Ю.Р., Дрюккер В.В., Сороковикова Е.Г. и др. 2018б. Санитарно-микробиологический и токсикологический мониторинг озера Байкал. часть 1: Акватория Малого моря в 2016 г. Системы контроля окружающей среды 11(31): 110-114. DOI: [10.33075/2220-5861-2018-1-110-114](https://doi.org/10.33075/2220-5861-2018-1-110-114)

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. Изв. Иркут. гос. ун-та 17: 71-62.

Щетинина Е.В., Максимов В.В., Крайковская О.В. и др. 2013. Оценка состояния водных масс южного Байкала

в районе влияния БЦБК по многолетним микробиологическим показателям. Водные ресурсы 40(6): 649-656. DOI: [10.7868/S0321059613060114](https://doi.org/10.7868/S0321059613060114)

Яснитский В.А., Бланков Б.Н., Гортиков В.И. 1927. Отчет о работе Байкальской лимнологической станции. Известия Биол.-геогр. Института при ИГУ 3(3): 47-54.

Drucker V.V., Panasyuk E.Yu. 2006. Potentially pathogenic bacteria in a microbial community of Lake Baikal. Hydrobiologia 568(1): 267-271.

Potapov S., Gorshkova A., Krasnopeev A. et al. 2023. RNA-Seq Virus Fraction in Lake Baikal and Treated Wastewaters. International Journal of Molecular Sciences 24: 1-26. DOI: [10.3390/ijms241512049](https://doi.org/10.3390/ijms241512049)

Shtykova Yu.R., Suslova M.Yu., Podlesnaya G.V. et al. 2020. Antibiotic-resistant opportunistic bacteria in the coastal zone of Lake Baikal. Limnology and Freshwater Biology. 4: 1026-1027. DOI: [10.31951/2658-3518-2020-A-4-1026](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-1026)

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? J. Great Lakes Res. 42(3): 487-497. DOI: [10.1016/j.jglr.2016.02.011](https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011)