

Water quality and ecological state estimate of large lakes of Yakutsk City (Lake Saysary, Lake Sergelyakh) in the end of ice period in 2021

Original Article

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYChebykin E.P.^{1*}, Mal'nik V.V.¹, Tomberg I.V.¹, Kopyrina L.I.², Suturin A.N.¹, Zakharova Yu.R.¹¹Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya st., 3, Irkutsk, 664033, Russia²Institute of Biological Problems in Permafrost Zone of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Lenin ave., 41, Yakutsk, 677980, Russia

ABSTRACT. Water quality of water bodies situated near populated localities is an important ecological problem. To estimate water quality in Lake Saysary and Lake Sergelyakh within Yakutsk City, hydrochemical, geochemical and microbiological methods were used. By research moment, the water in these lakes did not meet quality norms established for water of water bodies for fishery use as well as for drinking and cultural-domestic water use. The data obtained make pay attention to the necessity of the control for limitation of water use from these lakes for human needs and of activities for improvement of their quality.

Keywords: waters quality estimate, hydrochemical indicators, trace elements, microbiological indicators, urban Lakes, Yakutsk City

For citation: Chebykin E.P., Mal'nik V.V., Tomberg I.V., Kopyrina L.I., Suturin A.N., Zakharova Yu.R. Water quality and ecological state estimate of large lakes of Yakutsk City (Lake Saysary, Lake Sergelyakh) in the end of ice period in 2021 // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - P. 834-863. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-834

1. Introduction

Yakutsk City is the capital of Sakha Republic (Yakutia) and one of the largest cities in Russia within permafrost zone, the abundance of which increases permanently (Gorokhov, 2023) like its territory reaching 160 km² (Ksenofontova et al., 2013). For January 1, 2023 the abundance of the city population was 378.5 thousand people (Gorokhov, 2023; Population..., 2023). The city is situated on I and II flood-plain terraces in the central part of Tuymaada valley in middle current of the Lena R. left shore. The valley width in Yakutak City area reaches 18–20 km, among which ca. 8 km belong to modern bed of the Lena River with numerous island, by-arms and bayou lakes (Nikolaev and Arkhipov, 2021; Popova and Fedulova, 2022). There are on the city territory numerous lakes, five of them are largest (Beloje, Khatyng-Yuryakh, Ytyk-Kyuel', Sergelyakh, Saysary) (Legostaeva and Rufova, 2022). These lakes are related to water erosional type, their shapes are round and oblong (Ksenofontova et al., 2013). The urban lakes are very important for amenity

needs – they are used for recreation and watering in market-gardening (Rufova et al., 2012; Ksenofontova et al., 2013). Nowadays the lakes are under high anthropogenic press, as there are on the city territory large industrial, agricultural, housing and municipal and fuel and energy enterprises (Rufova et al., 2012). Before active building of the city in 1960ies (Makarov and Chizhuk, 2009; Popova and Fedulova, 2022), the lakes had a good by-channel system, were supplied from the Lena River and from small rivers (Shestakovka, Markhinka). Due to the increase of Yakutsk City territory and building in it, the flowage of major part of lakes was disturbed. Due to this fact, the lakes, which were cleaned regularly in natural way, started to get dirty, blossom, overgrow with rush and become shallow, and these processes resulted in decline of their ecological state (Ksenofontova et al., 2013). Since 2011, Yakutsk City authorities undertake activities for reconstitution of the flowage of the urban lacustrine system (Legostaeva and Rufova, 2022; Nikolaev and Arkhipov, 2021) which, in some cases, resulted in improvement

*Corresponding author.

E-mail address: cheb@lin.irk.ru (E.P. Chebykin)

Received: May 30, 2024; Accepted: June 14, 2024;

Available online: August 30, 2024

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



of ecological situation, for example, in Lake Saysary (Cherdonova and Popova, 2022). However, despite this, the drainage systems litter rapidly (Nikolaev and Arkhipov, 2021). The analysis of data bases by chemical composition of large lakes residential territories shows that since 1985 their mineralization decreases, main contribution of it belongs to more mineralized mineral waters (Legostaeva and Rufova, 2022). The same data suggest that seasonal and in some cases interannual variations of main hydrochemical characteristics are partly determined by riverine influence. Along with this, anthropogenic pressing is found out by numerous chemical (Makarov and Chizhuk, 2009; Rufova et al., 2012; 2013; Ksenofontova et al., 2013; Rufova and Ksenofontova, 2015; Rufova & Tatarinova, 2015, Kaidalova and Olesova, 2019; Gabyshev and Gabysheva, 2020; Nikolaev and Arkhipov, 2021; Popova and Fedulova, 2022; Legostaeva and Rufova, 2022; Rufova, 2023) and biological (Vasilyeva, 1968; Kopyrina, 2013; Tatarinova and Salova, 2013; Rufova and Tatarinova, 2015; Grigorieva and Solovieva, 2020; Gabyshev and Gabysheva, 2020; Cherdonova and Popova, 2022) components.

Earlier monitoring studies of water were performed at Lake Saysary (2009-2021) and Lake Sergelyakh (2009-2014) during open water period (Makarov and Chizhuk, 2009; Rufova et al., 2012; 2013; Ksenofontova et al., 2013; Rufova and Ksenofontova, 2015; Rufova and Tatarinova, 2015; Kaydalova and Olesova, 2019; Nikolaev and Arkhipov, 2021). Table 1 presents data on limits of variations of hydrochemical and geochemical indicators compiled with their averaged values for the period from 1985 till 2021 (Legostaeva and Rufova, 2022), with fishery norms (Order..., 2016) and with norms for drinking and cultural-domestic water use (SanPiN 1.2.3685-21).

Data for water microbiological characteristics of Lakes Saysary and Sergelyakh water published in scientific papers were not found by the authors. Internet provides information from Russian Consumer Protection Agency about swimming prohibition in Lake Sergelyakh due to exceed of norms of sanitary-epidemiological indicators (Swimming..., 2021).

Earlier the analysis of water quality in Yakutsk City lakes was performed during open water period. However, during major part of any year, eight months, these lakes are covered with ice. Permanent ice cover occurs since late September – early October, ice melting started in middle May, ice cover disappears completely in late May or early June (Nikolaev and Arkhipov, 2021).

In order to determine waters quality and ecological state of Lakes Saysary and Sergelyakh during ice period, a comprehensive analysis of samples collected in late April – early May of 2021 was performed. The paper presents for the first time the results of microbiological studies (total bacterial abundance – TBA, total microbial count at 22°C (TMC22) and 37°C (TMC37), *Escherichia coli* and bacteria of the genus *Enterococcus*) in water from these lakes, of expanded water geochemical analysis (66 chemical elements) and of additional hydrochemical indicators (concentration of total and organic phosphorus, permanganate oxidability).

2. Materials and methods

2.1. Description of the studied area

Lake Saysary

One of best studied lakes is Lake Saysary situated in the southern part of the city (Fig. 1), is included in the list of unique Yakutian lakes and is sacred in the history and legends of Yakut people and homeland of Sakha people (Nikolaev and Arkhipov, 2021). In winter, the lakes is actively used by city residents for skiing, in spring – for skating and mass feasts (Nikolaev and Arkhipov, 2021). The lake depression is situated on the II above flood-plane terrace and is related to erosional-anthropogenic genetic type (Kaydalova and Olesova, 2019; Cherdonova and Popova, 2022; Popova and Fedulova, 2022). The supply incomes mainly from precipitations (Kaydalova and Olesova, 2019; Popova and Fedulova, 2022). The lake sizes are as follows: the length is 1.4 km, the average width is 0.35 km, the maximal width is 0.47 km, the water table area is 0.49 km²; the average depth is 2.65 m, the maximal one is 6 m; the lakes volume is estimate as much as 1.23 million m³ (Legostaeva and Rufova, 2022). Snow cover height on Lake Saysary is 0.38 m, average ice thickness is 1.3 m (Nikolaev and Arkhipov, 2021). During recent years, anthropogenic impact onto the water body increased much, the water table area considerably decreased due to shores dumping for building, sewer plumbing and building and household wastes discharge (Rufova et al., 2013).

Lake Sergelyakh

Lake Sergelyakh is situated southward from Lake Saysary (Fig.) and is connected with it with pipes and a channel (Cherdonova and Popova, 2022). Lake Sergelyakh has a narrow serpentine shape. Total lake length by different estimates is from 6 (Legostaeva and Rufova, 2022) to 8 km (Ksenofontova et al., 2013), its average width is 0.08 km, maximal one is 0.15 km, water table area is 0.47 km², water volume is 0.42 million m³, average depth of the lake is 0.88 m, and maximal one is 2 m (Legostaeva and Rufova, 2022). According to satellite images (software SASPlanet with open access), the length of main part of united water body is 8 km 300 m, there are also branches with total length of 1.5 km.

2.2. Sampling

Water was sampled in the end of ice-cover period in 2021 – on April 21 from Lake Saysary (N 62° 01'10.0", E 129°41'38.6") and on May 4 from Lake Sergelyakh (N 61° 59'53.7", E 129°39'07.3") (Fig.). The snow thickness of Lake Saysary was 32 cm, the ice thickness was 105 cm, the water depth was 4 m, on Lake Sergelyakh – 0.5 cm, 105 cm and 1.5 m, respectively. Water was sampled with a Niskin bottle (volume of 2 dm³) from the depth of 1 m (from lower ice surface).

For hydrochemical analysis, water samples were spattered into 1.5 L PET bottles. To determine biogenic components and organic matter, the bottles were frozen, to determine other hydrochemical indicators, the bottles were kept in a fridge. Determination of pH was done several hours later after the sampling.

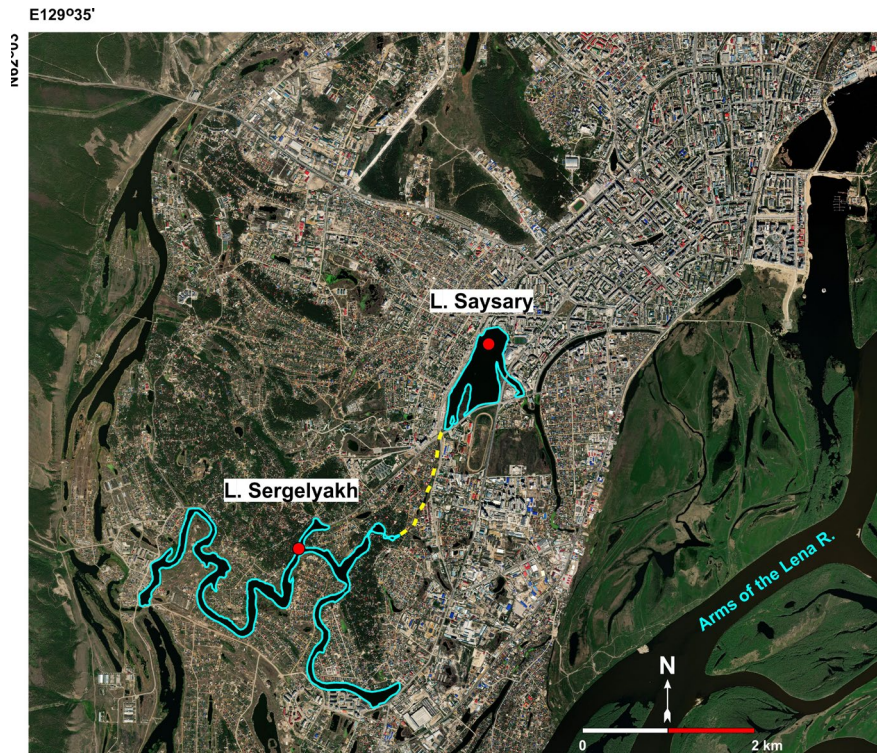


Fig. Lacustrine-riverine network in Yakutsk City. Sampling stations are shown with red circles. Yellow dashed line shows the channel connecting Lake Sergelyakh with Lake Sargsary. The satellite image is from open sources (resource SASPlanet).

For multielemental ICP-MS analysis, water was sampled from a Niskin bottle with single use medical syringes with volume of 10 mL. Samples were immediately filtered through single use polystyrol sterile syringe nozzle Minisart 16555-K (pores size was 0.45 μm , cellulose acetate, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Germany) into preliminary weighed polypropylene Eppendorf test tubes (2 ml, Axygen Scientific, Cat.-No. MCT-200-C, USA, Mexico) containing 40 μL of preserving agent. We used as a preserving agent 70 % HNO_3 purified twice with a subboiling system for acids distillation (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Japan). Indium (1008 ppb) was added into nitric acid as an internal standard. The preserving agent was added into Eppendorf test tubes by weighing method. Test tubes with water samples were weighed under laboratory conditions, and accurate content of nitric acid (typically 2 %) and of indium (typically 30 ppb) was calculated. All necessary weighing was done using an analytical balance Mettler Toledo AG104 (weighing error is $\pm 0,0003$ g).

For microbiological analysis, water was sampled from a Niskin bottle into new plastic bottles with volume of 0.5 L in two replications. Time period from sampling till microbiological analysis did not exceed 6 hours according to (GOST 31942-2012).

2.3. Hydrochemical analysis

Chemical composition was determined by methods adopted in freshwater hydrochemistry (Baram et al., 1999; Fomin, 2000; Wetzel and Likens, 2000; Guidelines..., 2009). To measure pH value, we used a pH meter with a combined electrode and a thermocompensator “Expert-001” (Russia). Total nitrogen, phosphorus and organic matter content was determined in

non-filtered samples, and biogenic elements and major ions content – in samples filtered through membrane filters with pore size of 0.45 μm . Biogenic elements concentrations were measured using a spectrophotometer «UNICO-2100» (USA): nitrites – with Griess reagent, nitrates – with sodium salicylate, ammonium nitrogen – by indophenol method, phosphates – by Denigès-Atkins method with tin chloride as a reducing agent. To determine siliceous acid, we used a spectrophotometry method based on measuring of staining intensity of yellow silicomolibdic heteropoly acid. Total phosphorus and nitrogen content was measured after high temperature persulfate oxidation on a spectrophotometer, organic matter content was estimated by permanganate (PMO) and bichromatic oxidability (referred as chemical oxygen demand – COD). Concentration of ions HCO_3^- , Cl^- , and SO_4^{2-} was determined by method of high-performance liquid chromatography with indirect UV-detection (“Milichrom A-O2”, Russia), of ions Ca^{2+} and Mg^{2+} – by absorption method, and Na^+ and K^+ – by flame emission one («AAS-30», Germany).

2.4. Multielemental ICP-MS analysis

Prepared water samples were measured at a quadruple ICP-MS mass-spectrometer Agilent 7500 ce in Common Use Center “Ultramicroanalysis” in LIN of RAS SB according to approaches developed earlier (Chebykin et al., 2012; 2020). The loading of the water samples to the spectrometer measuring system was performed using an acid-resistant interface. The latter consisted of a borosilicate MicroMist nebulizer (solutions supply regime is self-pulverizing ca. 200 $\mu\text{l}/\text{min}$), a perfluoroalkoxy (PFA) Scott spray chamber and gas quartz torch with a ruby injector and a ShieldTorch system. Measurements were performed in “hot plasma” mode

Table 1. Hydrochemical, geochemical and microbiological characteristics of Lake Saysary and Lake Sergelyakh according to references compiled to norms and our data. In bold – values exceeding fishery norms (MPC_f), in bold and underlined – norms for drinking and cultural-domestic water use (MPC_{dr_c/dom})

Characteristics	MPC _f	MPC _{dr_c/dom}	Lake Saysary, min-max (2009-2021)	Lake Saysary, averaged (1985-2021)	Lake Saysary, LIN of RAS SB (April 21, 2021)	Lake Sergelyakh, min-max (2009-2014)	Lake Sergelyakh, averaged (1985-2021)	Lake Sergelyakh, LIN of RAS SB (May 4, 2021)
Reference	(Order..., 2016)	(SanPin 1.2.3685-21)	reference list in the notes*	(Legostaeva & Rufova, 2022)	this paper	reference list in the notes*	(Legostaeva & Rufova, 2022)	this paper
pH	background	6-9	7.9-8.6 (2009-2012)	8.34	7.23	7.64-8.58	8.34	6.78
Ca ²⁺ , mg/dm ³	180	nn	17-40 (2009-2014, 2021)	27.4	82.4	22-42	25.44	28.4
Mg ²⁺ , mg/dm ³	40	50	10- 55 (2009-2014, 2021)	30.	50	8-30	21.21	14.1
Na ⁺ , mg/dm ³	120	200	40- 125 (2009-2014), 335 (Na+K, 2021)	77.6	117	22-45	47.42	24.8
K ⁺ , mg/dm ³	10 / 50 ⁽¹⁾	nn	5-8 (2009-2014)	6.51	16.5	~2-5	5.84	5.52
HCO ₃ ⁻ , mg/dm ³	nn	nn	165-313 (2009-2014), 540 (2021)	262	577	140-279	203.33	169.8
Cl ⁻ , mg/dm ³	300	350	20-> 300	83.8	174	<10-90	32.36	26
SO ₄ ²⁻ , mg/dm ³	100	500	nd	21.1	13.5	nd	14.07	10.0
Hard, meq/dm ³	nn	7 / 10 ⁽²⁾	< 4-20	4.04	8.3	1.5- 8	3.27	2.6
Min, mg/dm ³	nn	1000 / 1500 ⁽²⁾	180- 1246	479	1030	250-420	308.95	279
NH ₄ ⁺ , mg/dm ³	0.5	1.5	0.2-3.4	0.63	2.27	~ 0-1.6	0.35	0.66
NO ₂ ⁻ , mg/dm ³	0.08	3	0.02-3.2	0.13	0.003	<0.05	0.03	0.046
NO ₃ ⁻ , mg/dm ³	40	45	0-2.2	1.16	0.41	< dl	0.13	1.22
PO ₄ ³⁻ , mg/dm ³	0.15 / 0.45 / 0.6 ⁽³⁾	3.5	0.07-0.76	0.44	1.04	<dl- 2.4	0.33	0.162
P _{total} , mg/dm ³	nd	nd	nd	nd	0.53	nd	nd	0.228
P _{org} , mg/dm ³	nd	nd	nd	nd	0.19	nd	nd	0.175
COD, mg O ₂ /dm ³	nn	15 / 30 / 60 ⁽⁴⁾	< 15-150	nd	122	nd	nd	132.7
BOD ₅ , mg O ₂ /dm ³	2.1	2 / 4 ⁽⁵⁾	< 2.1-7.1	nd	nd	nd	nd	nd
PMO, mg O ₂ /dm ³	nn	5 / 7 / 7.5 ⁽⁶⁾	nd	nd	38.8	nd	nd	42.4
O ₂ diss, mg/dm ³	> 4 / > 6 ⁽⁷⁾	> 4	< 4-10	nd	nd	> 6	nd	nd
SM, mg/dm ³	to background + 0.25-0.75 / + 5% at > 30 at > 30 in low-wa-ter season ⁽⁸⁾	to background + 0.75 / + 5% at > 30 in low-wa-ter season ⁽⁹⁾	< 2-8	6.06	nd	2-13	6.41	nd
F ⁻ , µg/dm ³	to background + 50 / 750 (max) ⁽¹⁰⁾	to background + 50 / 750 (max) ⁽¹⁰⁾	< dl	310	nd	< dl	250	dl
Fe, µg/dm ³	100	300	< 100-1200	390	200	< 100-850	270	250
Mn, µg/dm ³	10	100	0.8-> 500	20	1050	6- 29	20	350

Characteristics	MPC_f	MPC_dr_c/dom	Lake Saysary, min-max (2009-2021)	Lake Saysary, averaged (1985-2021)	Lake Saysary, LIN of RAS SB (April 21, 2021)	Lake Sergelyakh, min-max (2009-2014)	Lake Sergelyakh, averaged (1985-2021)	Lake Sergelyakh, LIN of RAS SB (May 4, 2021)
Zn, µg/dm ³	10	1000	<10-390	120	0.83	<dl-490	20	5.1
Cu, µg/dm ³	1	1000	<1-11.7	1	<0.4	1.5-2.3	1	1.77
Pb, µg/dm ³	6	10	1.4-22.2	4	0.025	4.9-6.8	10	0.115
Sr, µg/dm ³	400	7000	nd	260	720	nd	150	170
Ba, µg/dm ³	740	700	nd	2	89	nd	20	32
Co, µg/dm ³	10	100	<dl	8	0.3	<dl	5	0.23
Cr, µg/dm ³	20	50	<dl	4	0.77	<dl	3	0.49
Mo, µg/dm ³	1	70	nd	4	0.1	nd	2	0.91
Li, µg/dm ³	80	30	<dl	<dl	10.6	<dl	20	2.9
Ni, µg/dm ³	10	20	<dl	<dl	3.9	<dl	<dl	1.69
As, µg/dm ³	50	10	<dl	<dl	1.9	<dl	<dl	0.84
Cd, µg/dm ³	5	1	<dl	nd	0.0016	<dl	nd	0.01
Hg, µg/dm ³	0.01	0.5	<dl	<dl	<0.02	<dl	<dl	<0.02
Be, µg/dm ³	0.3	0.2	nd	nd	0.011	nd	nd	0.005
B, µg/dm ³	500	500	nd	nd	122	nd	nd	14.3
Al, µg/dm ³	40	200	nd	nd	5.1	nd	nd	18.7
Si, µg/dm ³	nn	10000	nd	nd	1760	nd	Nd	1590
Sc, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	<0.125 ⁽¹⁴⁾	nd	nd	<0.073 ⁽¹⁴⁾
Ti, µg/dm ³	60	100	nd	nd	1.14	nd	nd	0.76
V, µg/dm ³	1	100	nd	nd	1.66	nd	nd	0.85
Ga, µg/dm ³	nd	nd	nd	nd	0.009	nd	nd	0.017
Ge, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.015	nd	nd	0.0019
Se, µg/dm ³	2	10	nd	nd	0.33	nd	nd	0.05
Br, µg/dm ³	1350	200	nd	nd	310	nd	nd	77
Rb, µg/dm ³	100	70	nd	nd	4.2	nd	nd	2.9
Y, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.103	nd	nd	0.072
Zr, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.3	nd	nd	0.16
Nb, µg/dm ³	nn	10	nd	nd	0.039	nd	nd	0.014
Ag, µg/dm ³	nn	50	nd	nd	0.0006	nd	nd	<0.0004
Sn, µg/dm ³	112	nn	nd	nd	0.012	nd	nd	0.014
Sb, µg/dm ³	nn	5	nd	nd	0.18	nd	nd	0.2
Te, µg/dm ³	3	10	nd	nd	<0.008	nd	nd	<0.008

Characteristics	MPC_f	MPC_dr_c/dom	Lake Saysary, min-max (2009-2021)	Lake Saysary, averaged (1985-2021)	Lake Saysary, LIN of RAS SB (April 21, 2021)	Lake Sergelyakh, min-max (2009-2014)	Lake Sergelyakh, averaged (1985-2021)	Lake Sergelyakh, LIN of RAS SB (May 4, 2021)
I, µg/dm ³	400	125	nd	nd	35	nd	nd	10.3
Cs, µg/dm ³	1000	nn	nd	nd	0.0021	nd	nd	0.0024
La, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.074	nd	nd	0.075
Ce, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.125	nd	nd	0.134
Pr, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.014	nd	nd	0.017
Nd, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.07	nd	nd	0.059
Sm, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.023	nd	nd	0.021
Eu, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.008 ⁽¹⁵⁾	nd	nd	0.0025 ⁽¹⁵⁾
Gd, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.013	nd	nd	0.014
Tb, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.0022	nd	nd	0.002
Dy, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.012	nd	nd	0.009
Ho, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.0034	nd	nd	0.0028
Er, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.01	nd	nd	0.008
Tm, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.0014	nd	nd	0.0011
Yb, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.008	nd	nd	0.006
Lu, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.0019	nd	nd	0.001
Hf, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.006	nd	nd	0.003
Ta, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.0013	nd	nd	0.0009
W, µg/dm ³	0.8	50	nd	nd	0.007	nd	nd	0.029
Re, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.0009	nd	nd	0.0007
Tl, µg/dm ³	nn	0.1	nd	nd	<0.001	nd	nd	<0.001
Bi, µg/dm ³	nn	100	nd	nd	0.0031	nd	nd	0.0029
Th, µg/dm ³	nn	nn	nd	nd	0.0067	nd	nd	0.02
U, µg/dm ³	nn	15	nd	nd	1.1	nd	nd	1.2
TBA, cells/cm ³	nn	nn	nd	nd	14.6 × 10 ⁶	nd	nd	6.4 × 10 ⁶
TMC22, CFU/cm ³	nn	nn	nd	nd	323	nd	nd	14080
TMC37, CFU/cm ³	nn	50 / 100 ⁽¹¹⁾	nd	nd	33	nd	nd	447
Enterococcus, CFU/100 cm ³	nn	0 / 100 / 10 / nn ⁽¹²⁾	nd	nd	36	nd	nd	346
<i>E. coli</i> , CFU/100 cm ³	nn	0 / 100 / 100 / 10 ⁽¹³⁾	nd	nd	4	nd	nd	240

Notes: nn – no norms; nd – no data; <dl – below detection limits of measurements methods; Hard – hardness; Min – mineralization (major ions sum); SM – suspended matter.

(1) Potassium concentration not more than 10 mg/dm³ for waterbodies with mineralization up to 100 mg/dm³.

(2) Drinking water of centralized supply: Min – not more than 1000 mg/dm³, H – not more than 7 meq/dm³; drinking water of non-centralized supply: Min – not more than 1500 mg/dm³, H – not more than 10 meq/dm³.

- (3) Phosphates $< 0.15 \text{ mg/dm}^3$ – oligotrophic, $0.15\text{-}0.45 \text{ mg/dm}^3$ – mesotrophic, $> 0.6 \text{ mg/dm}^3$ – eutrophic waterbodies.
- (4) COD must not exceed $15.0 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$ in the waters of surface water sources used for centralized water supply of people, for domestic use, in sites of water intake for swimming pools, balneary. COD must not exceed $30.0 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$ in water of surface water sources used for recreation, as well as within inhabited sites, in open systems of technical water supply and for streets and green spaces watering. COD must not exceed $60.0 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$ in systems of technical water reuse in manual and automatic car wash.
- (5) BOD5 must not exceed $2 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$ in water of surface water sources used for centralized water supply to people, for domestic use, in sites of water intake for swimming pools, balneary. BOD5 must not exceed $4 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$ in water of surface water sources used for recreation, as well as within inhabited sites. BOD5 must not exceed $5 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$ in open systems of technical water supply and for streets and green spaces watering. BOD5 must not exceed $10 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$ in systems of technical water reuse in manual and automatic car wash.
- (6) PMO must be not more than $5 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$ in drinking water of centralized water supply, not more than $7 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$ in drinking water of non-centralized water supply, not more than $7.5 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$ in fun water parks water.
- (7) Dissolved oxygen content in water must be not less than $4 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$ in winter, not less than $6 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$ in summer.
- (8) Suspended matter content at discharge of return (waste) waters by a concrete water user while performing any activities at any water body and in the near-shore zone in a control site must not increase compared to natural conditions by more than 0.25 mg/dm^3 (for highest and first categories of a water body of fishery importance) or by more than 0.75 mg/dm^3 (for a second category of a water body of fishery importance). In water bodies of fishery importance with more than 30 mg/dm^3 suspended matter content during low-water season, their content in water is admissible within 5%. Return (waste) waters containing suspended matter with precipitation rate of $> 0.4 \text{ mm/sec}$ are forbidden for discharging into the water flows, at precipitation rate of $> 0.2 \text{ mm/sec}$ – into water bodies.
- (9) Suspended matter content at discharge of waste waters, while performing any activities at any water body and in the near-shore zone in a control site must not increase compared to natural conditions by more than 0.25 mg/dm^3 for recreation water use, and within populated sites – by more than 0.75 mg/dm^3 . In water bodies with more than 30 mg/dm^3 suspended matter content during low-water season, their content in water is admissible within 5%. Suspended matter with precipitation rate of $> 0.4 \text{ mm/sec}$ for flowing water bodies and $> 0.2 \text{ mm/sec}$ for waterbodies are forbidden for discharge. For technical water in open systems of technical water supply and for streets and green spaces watering, suspended matter content must not exceed 5.0 mg/dm^3 , and for technical water in systems of technical reused water supply in manual and automatic car wash – 20.0 mg/dm^3 (60.0 mg/dm^3 – for wheel car washers).
- (10) Fluorides content must be not more than 50 mg/dm^3 as additional to background one but not exceeding their summary content 750 mg/dm^3 .
- (11) TMC37 must be not more than 50 CFU/cm^3 for systems of centralized drinking and hot water supply, not more than 100 CFU/cm^3 for systems of non-centralized drinking water supply.
- (12) Enterococci must be absent in water in systems of centralized drinking and hot water supply and non-centralized drinking water supply as well as in waters of swimming pools and fun water parks; in surface waters for drinking and domestic water supply as well as for water supply to food establishments – not more than $100 \text{ CFU} / 100 \text{ cm}^3$; in recreation zones as well as within populated sites (for swimming and aquatic sports) – not more than $10 \text{ CFU} / 100 \text{ cm}^3$; in natural waters for technical water supply – no norms.
- (13) *E. coli* must be absent in water of systems of centralized drinking and hot water supplies and non-centralized drinking water supply as well as in water of swimming pools and fun water parks; in surface waters for drinking and domestic water supply as well as for water supply of food establishments – not more than $100 \text{ CFU} / 100 \text{ cm}^3$; in recreation zones as well as within populated sites (for swimming and aquatic sports) – not more than $100 \text{ CFU} / 100 \text{ cm}^3$; in natural waters of technical water supply (car wash, streets and green spaces watering) – not more than $10 \text{ CFU} / 100 \text{ cm}^3$.
- (14) Concentration of Sc may be elevated due to complexity of account of interferences with SiO (determining by ICP-MS method).
- (15) Concentration of Eu may be elevated due to complexity of account of interferences with BaO (determining by ICP-MS method).
- * (Makarov and Chizhuk, 2009) – PO43-;
- (Rufova et al., 2012) – pH, hardness, total mineralization, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , F, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Co, Cr, Ni, Cd, Hg;
- (Rufova et al., 2013) – NH_4^+ , Fe, Mn, Zn, Pb;
- (Ksenofontova et al., 2013) – pH, hardness, O_2 -diss, suspended matter; NH_4^+ , Fe, Mn, Zn, Cu;
- (Rufova and Ksenofontova, 2015) – pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl, hardness, total mineralization, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Co, Cr, Ni, As, Cd, Hg;
- (Rufova and Tatarinova, 2015) – Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NO_3^- , F, Fe, Pb, Co, Cr, Ni, As, Cd, Hg;
- (Kaydalova and Olesova, 2019) – Mg^{2+} , Na^+ , Cl, hardness, total mineralization, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , COD, BOD5, O_2 -diss, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Co, Ni, Hg;
- (Nikolaev and Arkhipov, 2021) – Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl, hardness, total mineralization, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , BOD5, O_2 -diss, Fe;
- (Legostaeva and Rufova, 2022) – mineralization, suspended matter, averaged hydrochemical and geochemical characteristics.

(plasma generator capacity was 1580 W) without a collision cell.

The solutions were measured in a scanning mode with an additional desensitization of signals by 30 times for the isotopes ^{23}Na , ^{27}Al , ^{28}Si , ^{39}K and ^{115}In (3 channels per mass, 0.05 sec per channel, total scanning time of a mass spectrum was – 62 sec, washing between samples was – 60 sec).

To calibrate the mass-spectrometer, we used multi-elemental standard solutions ICP-MS-68A-A and ICP-MS-68A-B (HIGH-PURITY STANDARDS, Charleston, USA), a sample of Baikalian bottled water (for Na, Mg, Si, S, Cl, K, Ca, (Suturin et al., 2003)), as well as cations (Na, Mg, K, Ca, Fe, Hg) and anions (Si, P, S, Cl, Br, I) solutions made by mixing of single-element ICP-MS standard solutions from Inorganic Ventures (USA).

Correction for interfering molecular ions (MeO^+ , MeOH^+ , MeAr^+ , MeCl^+) was done using the approach described in (Aries et al., 2000).

Typical measuring errors (variation coefficient of RSD) depending on chemical elements concentrations are in the following ranges: $< 0.001 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ – RSD $> 25\%$; $0.001\text{-}0.1 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ – RSD $25\text{-}10\%$; $0.1\text{-}1 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ – RSD $10\text{-}5\%$; $> 1 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ – RSD 5% .

2.5. Microbiological analysis

Total bacterial abundance (TBA) was counted by method of direct accounting of preparations stained with a fluorochromic dye DAPI (4,6-diamidino-2-phenylindol) (Porter and Feig, 1980), using epifluorescent microscopy (Axiovert 200 Zeiss, Germany) with an ultraviolet lamp HBO 50W/AC ASRAM with excitation spectrum of 365 nm (Bashenkhaeva et al., 2015). While calculating cells, minimum 30 eyepiece fields per sample were examined, calculations were performed using a recommended formula (Murray et al., 1994).

Organotrophic bacteria were determined under different culturing conditions. Fish-peptone agar diluted 10 times (FPA/10) was used to determine the abundance of autochthonous microflora natural for this water body, the inoculations were incubated at 22°C during 72 h (TMC 22) (Gorbenko, 1961). On meat-peptone agar (MPA), after incubation at $37 \pm 1^\circ\text{C}$ during 24 h, we determined the abundance of allochthonous microflora supplied into the body due to anthropogenic pollution (TMC37). Self-purification coefficient (SPC) was determined by ratio of values of TMC indicator determined at temperatures of 22°C and 37°C .

Sanitary-microbiological indicators were determined according to (SanPiN 1.2.3685-21). Detection and counting of the studied bacterial groups were performed by method of membrane filtration on nitrocellulose filters with pores diameter of $0.45 \mu\text{m}$ according to (MUK 4.2.1884-04) and (GOST 24849-2014). The abundance of thermotolerant *E. coli* was determined by method of membrane filtration using High-chrome agar (produced by «Himedia» No M1571) (GOST 24849-2014).

The presence of faecal enterococci was revealed by method of membrane filtration using nutrient selec-

tive agar Slanetz and Bartley Medium (produced by «Himedia» No M 612) and Bile Esculine Azide Agar (produced by «Himedia» No M493) (GOST 24849-2014). The results were analyzed according to (MUK 4.2.1884-04, GOST 24849-2014).

3. Results and discussion

3.1. pH, composition of major ions

During the studies period, both lakes water had a weakly alkaline reaction, and, according to classification by Alekin (Alekin, 1953), was related to hydrocarbonate class (Table 1). Among cations, Ca^{2+} and Na^+ dominated in the water of both lakes, In Lake Saysary, the concentration of Na^+ ($117 \text{ mg}/\text{dm}^3$) was a little higher than one of Ca^{2+} ($82.4 \text{ mg}/\text{dm}^3$), and in Lake Sergelyakh, vice versa, the concentration of Ca^{2+} ($28.4 \text{ mg}/\text{dm}^3$) was a little higher than one of Na^+ ($24.8 \text{ mg}/\text{dm}^3$). In Lake Saysary, major ions concentrations, except SO_4^{2-} , exceeded their averaged values obtained during 1985-2021 (Legostaeva and Rufova, 2022) (further we are going to use the term “characteristic values”) 1.5-3 times, and total mineralization ($1030 \text{ mg}/\text{dm}^3$) – ca. 2 times. Concentration of K^+ , Ca^{2+} and HCO_3^- in Lake Saysary exceeded maximal values observed during open water period in 2009-2021 (the range of concentrations variations for the accessible observations period will be called further “monitoring values”). This may suggest both more intensive feeding with underground and riverine waters in winter compared to atmospheric moisture and anthropogenic factors impact (Rufova et al., 2012), drainage from which can income into the lake with ground waters (Makarov and Chizhuk, 2009).

Mineralization of Lake Saysary ($1030 \text{ mg}/\text{dm}^3$) exceeded a little maximum permissible concentrations (MPC) for drinking water of centralized water supply ($1000 \text{ mg}/\text{dm}^3$) but was less than MPC for drinking water of non-centralized water supply ($1500 \text{ mg}/\text{dm}^3$) (SanPiN 1.2.3685-21). Among major ions, concentration of Mg^{2+} ($50 \text{ mg}/\text{dm}^3$) in Lake Saysary reached MPC for drinking and cultural-domestic water use (MPC_{dr_c/dom}) and exceeded norms for fishery purposes (1.25 MPC_f). Water hardness in Lake Saysary ($8.3 \text{ meq}/\text{dm}^3$) exceeded MPC for drinking water from centralized water supply 1.2 time ($7 \text{ meq}/\text{dm}^3$) but was less than MPC for drinking water from non-centralized water supply ($10 \text{ meq}/\text{dm}^3$).

Lake Sergelyakh is fresher, water mineralization (major ions sum) in it was $279 \text{ mg}/\text{dm}^3$, this is 3.7 times less than in Lake Saysary (Table 1). Major ions concentration in Lake Sergelyakh was 1.5-2 times lower than characteristic values, this may suggest other character of lake hydrological regime compared to Lake Saysary. Concentration of K^+ in Lake Sergelyakh exceeded a little maximal monitoring values observed during open water period in 2009-2014.

3.2. Biogenic components

Maximal concentration of ammonium (NH_4^+ = $2.27 \text{ mg}/\text{dm}^3$) exceeding both norms (4.5 MPC_f

(Order..., 2016) and 1.5 MPC_{dr_c/dom} (SanPiN 1.2.3685-21)) was found in Lake Saysary (Table 1). In Lake Sergelyakh, concentration of ammonium ($\text{NH}_4^+ = 0.66 \text{ mg/dm}^3$) exceeded fishery norms 1.3 times.

According to classification of pollution degree of water bodies by ammonium nitrogen content (in mg/dm^3): very clean (< 0.05), clean (0.05-0.1), moderately polluted (0.2-0.3), polluted (0.4-1.0), dirty (1.1-3.0) and very dirty (> 3.0), (Kharaev et al., 2004), Lake Saysary is related to the category “dirty”, and Lake Sergelyakh – to category “polluted”. The obtained ammonium concentrations in Lake Saysary are close to maximal monitoring values (3.4 mg/dm^3) and are 3.6 times higher than characteristic values (0.63 mg/dm^3). In Lake Sergelyakh, ammonium concentration is 2.4 times lower than maximal monitoring values (1.6 mg/dm^3), however, it is almost twice higher than characteristic values (0.35 mg/dm^3) (Table 1).

Concentration of ammonium oxidation products (NO_2^- , NO_3^-) in Lake Saysary is less than in Lake Sergelyakh (Table 1). This suggests that Lake Saysary is more effected by intensive fresh faecal pollution.

Concentration of nitrites and nitrates in both lakes was less than established norms. Concentration of nitrites in Lake Saysary is very small (0.003 mg/dm^3), seven times lower than minimal monitoring values (0.02 mg/dm^3) and 43 times lower than characteristic values (0.13 mg/dm^3).

Concentration of nitrites in Lake Sergelyakh (0.046 mg/dm^3) is comparable with monitoring values ($< 0.05 \text{ mg/dm}^3$) and 1.5 time higher than characteristic values (0.03 mg/dm^3).

Concentration of nitrates in Lake Saysary (0.41 mg/dm^3) was 5.4 times lower than maximal monitoring values (2.2 mg/dm^3) and 2.8 times lower than characteristic values (1.16 mg/dm^3).

Concentration of nitrates in Lake Sergelyakh (1.22 mg/dm^3) was almost by one order of magnitude higher than characteristic values (0.13 mg/dm^3). At monitoring studies during open water period in 2009-2014, nitrates in Lake Sergelyakh were not found, the authors (Rufova and Ksenofontova, 2015; Rufova and Tatarinova, 2015) do not present detection limits.

In the whole, summary concentration of nitrogen under its different forms (NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^-) in Lake Saysary was 2.3 times higher than in Lake Sergelyakh. It is seen in Figure 1 that Lake Saysary is in the area of dense urban buildings, and Lake Sergelyakh – in horticultural business areas. Summary concentration of nitrogen under its different forms in Lake Saysary exceeded characteristic values 2.3 times, and in Lake Sergelyakh 2.6 times; this is probably due to peculiarities of ice-cover period.

By concentration of phosphates (1.04 mg/dm^3) at studies period, Lake Saysary is related to the category of hypertrophic water bodies (Table 1). Phosphates concentration exceeded at that time characteristic values (0.44 mg/dm^3) 2.4 times and maximal monitoring values (0.76 mg/dm^3) 1.4 time. In Lake Sergelyakh, phosphates concentration (0.162 mg/dm^3) was 6.4 times less than in Lake Saysary, two times lower than characteristic values (0.33 mg/dm^3) and by one order

of magnitude lower than maximal monitoring values (2.4 mg/dm^3). By concentration of phosphate at studies moment, Lake Sergelyakh is related to the category of mesotrophic water bodies ($0.15\text{-}0.45 \text{ mg/dm}^3$).

Concentration of total phosphorus (P_{tot}) in Lake Saysary was 0.53 mg/dm^3 , and one of organic phosphorus (P_{org}) – 0.19 mg/dm^3 . Fraction of P_{org} in Lake Saysary water was 36%. Concentration of P_{tot} in Lake Sergelyakh was 0.23 mg/dm^3 , this is 2.3 times lower than in Lake Saysary. Concentration of P_{org} in Lake Sergelyakh was almost the same as in Lake Saysary and was $\sim 0.18 \text{ mg/dm}^3$. Thus, fraction of P_{org} in Lake Sergelyakh water was 77%, this is twice higher than in Lake Saysary. This suggests a more effective phosphorus utilization by biota in Lake Sergelyakh.

Differences of lakes by biogenic charge is probably due to uneven distribution of anthropogenic factors.

Concentration of Si in Lake Saysary ($1760 \mu\text{g/dm}^3$) and in Lake Sergelyakh ($1590 \mu\text{g/dm}^3$) was comparable. During the studies period, by this indicator water in both lakes is suitable for drinking and cultural-domestic water use, as it is ca. six times lower than MPC_{dr_c/dom} ($10\,000 \mu\text{g/dm}^3$). Fishery norm for Si is not established. We failed to find characteristic and monitoring values of Si in the studied lakes.

3.3. Organic matter

Organic matter content was estimated by parameters of COD (total amount of dissolved organic matter) and PMO (content of easily oxidized organic matter). COD in Lake Saysary was $122 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$, this is comparable with COD in Lake Sergelyakh ($133 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$). PMO parameters in these lakes are also close – 38.8 and $42.4 \text{ O}_2/\text{dm}^3$, respectively.

COD parameters in both lakes exceeded MPC for technical water use ($60 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$) ~ 2 times. COD parameters in both lakes exceeded MPC in water bodies for recreation as well as MPC for water bodies within populated areas, MPC for water in open systems of technical water supply, MPC for water for streets and green sites watering ($30 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$) – ~ 4 times. COD parameters in both lakes exceeded MPC in surface waters used for centralized water supply of people, MPC for water for domestic water use, in sites of water intake for swimming pools and balneary ($15 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$) – 8-9 times (Table 1). It means that the water from Lake Saysary and Lake Sergelyakh cannot be used for all these aims during the studied period.

PMO parameters have norms for drinking water of centralized (not more than $5 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$) and non-centralized (not more than $7 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$) water supply, as well as for water in fun water parks (not more than $7.5 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$). The studied lakes exceeded established norms by these indicators minimum 5 times. It means that during the studied period, the water from these lakes may not either be used for drinking and fun water parks.

Comparing the results obtained with monitoring observations, we can see that COD in Lake Saysary is close to maximal values ($150 \text{ mg O}_2/\text{dm}^3$) found out during open water periods in 2009-2021. Characteristic

COD values for Lake Saysary are not presented in (Legostaeva and Rufova, 2022). Any data concerning COD and PMO for Lake Sergelyakh were not found in scientific papers as well (Table 1).

By PMO/COD ratio we can estimate qualitative composition of organic matter in natural waters (Skopintsev, 1950; Skopintsev and Goncharova, 1987). The value of PMO/COD = 40% is accepted as a conventional boundary of organic matter of allochthonous and autochthonous origin. In Lake Saysary this value is 31%, and in Lake Sergelyakh – 32%. It means that in both lakes major part of organic matter is autochthonous.

3.4. Trace elements

Trace elements are chemical elements whose concentrations in natural waters less than 1 mg/dm³ (Gaillardet et al., 2003).

Concentration of Fe, which is related as well to biogenic elements, in Lake Saysary (200 µg/dm³) and Lake Sergelyakh (250 µg/dm³) exceeded fishery norms 2 and 2.5 times, respectively (Table 1). In Lake Sergelyakh, concentration of Fe was close to characteristic values (270 µg/dm³) and 3.4 times lower than maximal monitoring values (850 µg/dm³), and in Lake Saysary concentration of Fe was almost 2 times lower than characteristic values (390 µg/dm³) and 2.7 times lower than maximal monitoring values (530 µg/dm³). By this indicator, water from both lakes is suitable for drinking and cultural-domestic water use (MPC_{dr_c/dom} = 300 µg/dm³).

Concentration of Mn in Lake Saysary (1050 µg/dm³) was three times higher than in Lake Sergelyakh (350 µg/dm³). Both indicators considerably exceeded fishery norms (MPC_f = 10 µg/dm³) – 105 and 35 times, respectively as well as water norms for drinking and cultural-domestic water use (MPC_{dr_c/dom} = 100 µg/dm³) – 10.5 and 3.5 times, respectively. Concentration of Mn in both lakes considerably exceeded as well characteristic values (20 µg/dm³) – ~50 and 17.5 times, respectively. It is noticed in (Kaydalova and Olesova, 2019) that high and extremely high pollution levels in Lake Saysary with manganese related to fishery norms were found out during winter-summer low water season in 2012 and 2013. It means that at that time concentration of Mn could be > 500 µg/dm³, however, the authors do not indicate, in what extent more. Concentration of Mn in Lake Sergelyakh exceeded by one order of magnitude maximal monitoring values (29 µg/dm³).

High levels of Mn content in lakes water during ice-cover period are mainly due to the peculiarities of its chemical behavior. The concentration of Mn in natural waters is influenced by content of dissolved oxygen and by value of reduction-oxidation potential. Under moderate oxidation conditions, soluble Mn²⁺ transfers into insoluble Mn⁴⁺, which migrates mainly in colloid forms (~90%, Pokrovsky et al., 2006), it can be utilized into bottom sediments and/or sorbed by suspended matter (Chebykin et al., 2012). During freezing up, at oxygen deficiency, reversal processes of Mn mobilization from bottom sediments occur – during a seasonal cycle

it concentration in water can vary tens and hundreds times (Chebykin et al., 2012). Mn can as well income into water bodies fed by underground waters, which, as a rule, contain considerably more Mn compared to surface waters (Suturin et al., 2016). Mobilization of Mn into water can as well be due to swampy landscape (acid environment) and decrease of flow rate. On the background of such considerable natural processes, it is very difficult to reveal anthropogenic contribution. During ice-cover period, water from both lakes by this indicator is not suitable for drinking without preliminary purification.

Concentration of Zn in Lake Saysary (0.83 µg/dm³) and Lake Sergelyakh (5.1 µg/dm³) was lower than MPC_f (10 µg/dm³) and considerably lower than MPC_{dr_c/dom} (1000 µg/dm³) as well as than characteristic values, which are 120 and 20 µg/dm³ for Lake Saysary and Lake Sergelyakh, respectively (Table 1). Maximal monitoring values of Zn are 390 and 490 µg/dm³ for Lake Saysary and Lake Sergelyakh, respectively. Such high values are not characteristic for natural water bodies and raise doubts concerning the quality of analytical data.

Concentration of Cu in Lake Saysary was < 0.4 µg/dm³, this is lower than MPC_f (1 µg/dm³) and considerably lower than MPC_{dr_c/dom} (1000 µg/dm³). In Lake Sergelyakh concentration of Cu (1.77 µg/dm³) exceeded fishery norms ~ 1.8 time. Characteristic concentration of Cu in both lakes is 1 µg/dm³ with variations of monitoring values < 1-11.7 µg/dm³ in Lake Saysary and 1.5-2.3 µg/dm³ in Lake Sergelyakh (Table 1). During the studied period, water of both lakes is suitable by this indicator for drinking and cultural-domestic water use.

Concentration of Pb in Lake Saysary (0.025 µg/dm³) and in Lake Sergelyakh (0.025 µg/dm³) was considerably lower than MPC_f (6 µg/dm³), MPC_{dr_c/dom} (10 µg/dm³) and characteristic values (4 and 10 µg/dm³ for Lake Saysary and Lake Sergelyakh, respectively). Variations of monitoring value for Pb are 1.4-22.2 and 4.9-6.8 µg/dm³ for Lake Saysary and Lake Sergelyakh, respectively. Such a big difference of our data with published ones is most probably due to an analytical factor. In this work, a highly sensitive method of multi-elemental ICP-MS analysis was used, it has elements detection limits by several orders of magnitude lower than traditionally used methods (atomic absorption, etc.). Most probably, the authors who performed monitoring studies used methods (unfortunately, they do not tell which ones), the detection limits of which leave to be desired. This difference is seen practically for all elements with a characteristic concentrations at the level of ones or tens of µg/dm³ and lower (Zn, Co, Cr, Mo, Li) (Table 1).

Among other trace elements exceeding established norms we detected Sr (1.8 MPC_f), V (1.7 MPC_f) and Br (1.6 MPC_{dr_c/dom}) in Lake Saysary. Concentration of Sr (720 µg/dm³) in Lake Saysary exceeded characteristic values (260 µg/dm³) 2.8 times. In Lake Sergelyakh, concentration of Sr (170 µg/dm³) was 2.4 times lower than MPC_f (400 µg/dm³) and a little higher than characteristic values (150 µg/dm³). We

failed to find in papers characteristic and other values concerning V, Br and major part of other trace elements we measured.

3.5. Geochemical composition

On one hand, geochemical composition of bodies is very specific, on the other hand, it is variable, it forms under the influence of numerous natural-climatic, physical, physico-chemical, biological and anthropogenic factors, which influence water interaction with rocks, soils, biota and atmosphere (Perelman, 1982). The data obtained (Table 1) suggest that in about half cases, the concentration of chemical elements in Lake Saysary was higher than in Lake Sergelyakh (times): Co (1.3), Y (1.4), Ta (1.4), Rb (1.5), Ti (1.5), Cr (1.6), Sc (1.7), Zr (1.9), V (2), Hf (2), Be (2.2), As (2.3), Ni (2.3), P (2.3), Ba (2.8), Nb (2.8), Ca (2.9), K (3), Mn (3), I (3.4), Mg (3.6), Li (3.7), Br (4), Sr (4.2), Na (4.7), Se (6.6), Cl (6.7), Ge (7.9) and B (8.5). On the contrary, in ten cases it was lower (times): Fe (1.3), Ga (1.9), Th (3), Al (3.7), W (4.1), Cu (4.4), Pb (4.6), Zn (6.1), Cd (6.3) и Mo (9.1). We detected no differences between lakes by other elements (Hg, Si, Ag, Sn, Sb, Te, Cs, REE, Ta, Re, Tl, Bi and U) within errors of determination of their concentrations.

3.6. Comprehensive estimate of waters quality by hydrochemical and geochemical indicators

The data obtained do not allow to use formal comprehensive indicators such as normalized combinatory index of waters pollution (NCIWP) and index of waters pollution (IWP).

To estimate the first index, it is required to perform determination of 15 mandatory indicators (O_2 -diss, BOD5, COD, phenols, petrochemicals, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , Cl⁻, SO_4^{2-} , Fe, Mn, Cu, Zn, Ni) (RD 52.24.643-2002), among which we did not determine O_2 -diss, BOD5, phenols and petrochemicals. While calculating NCIWP, along with multiplicity of MPC exceed, indicators of comprehensiveness and repeatability of pollution for a studied period are used. In this work only a single testing was done, therefore, a repeatability indicator cannot be determined. Depending of NCIWP value, water hazard class is determined from I (conventionally clean) to V (extremely dirty).

To estimate the second indicator, we need to determine six most important indicators for this water body, among which O_2 -diss and BOD5 are mandatory (Temporary..., 1986). Depending on IWP value, a water hazard class is determined from I (very clean) to VII (exceedingly dirty). In this work, two latter indicators were not determined. To compare pollution degrees between Lake Saysary and Lake Sergelyakh, IWP was calculated with available pollutions set, where instead BOD5 an approximate parameter – permanganate oxidability (PMO) – can be used. The pollutants set was not limited with six most important indicators, all n indicators of C_i , which reached or exceeded established

norms (MPC_f and MPC_{dr_c/dom}) at least in one of the lakes were used:

$$IWP(c) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{MPC_i} \right) / n \quad (1),$$

where IWP(c) is a conventional index of pollution in the studied lakes.

According to the data obtained, there are seven such indicators by fishery norms (Mg^{2+} , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Fe, Mn, Cu, and V) and nine indicators by norms for drinking and cultural-domestic water use (Mg^{2+} , water hardness, water mineralization, NH_4^+ , PO_4^{3-} , COD, PMO, Mn and Br) (Table 2).

The Table 2 presents degrees of exceeding of MPC by chosen indicators and calculated pollution levels (PL) (RD 52.24.643-2002) and conventional indices of waters pollution IWP(c).

In Lake Saysary IWP(c)_f was 16.7, this is 2.8 times higher than in Lake Sergelyakh (IWP(c)_f = 6). It means that by fishery norms Lake Saysary was almost three times worse than Lake Sergelyakh. Overwhelming contribution into IWP(c)_f in both cases was made by Mn, which exceeded established norms 105 times in Lake Saysary and 35 in Lake Sergelyakh, these are extremely high and high pollution levels, respectively. Average water pollution levels for fishery needs were found by ammonium (4.5 MPC_f) in Lake Saysary and by Fe (2.5 MPC_f) in Lake Sergelyakh. Pollution level by other components was low or absent (Table 2).

IWP(c)_{dr_c/dom} in Lake Saysary was 3.42, this is 1.5 time higher than in Lake Sergelyakh (IWP(c)_{dr_c/dom} = 2.25). It means that by norms for drinking and cultural-domestic water use Lake Saysary was also worse than Lake Sergelyakh. In both cases main contribution into this index was done by COD, PMO and Mn, which exceeded established norms ~8/~9, ~5/~6 and 10.5/3.5 times for Lake Saysary/Lake Sergelyakh, respectively. By organic matter content the water in both lakes met a conventionally high pollution level, which, due to absence of statements in governing documents is calculated by analogy with multiplicity of MPC exceed by the indicator BOD5 (RD 52.24.643-2002) (see notes to Table 2). By concentration of Mn water in Lake Saysary met a high pollution level and Lake Sergelyakh water – medium pollution level. The pollution level by other component was low or absent (Table 2). Thus, use of lakes water for drinking and cultural-domestic needs was the most dangerous by content of organic matter along with Mn.

3.7. Microbiological characteristics

TBA in Lake Saysary was 14.6×10^6 cells/cm³, and in Lake Sergelyakh 6.4×10^6 cells/cm³. According to the GOST 17.1.3.07-82, TBA is an indicator of a water body sanitary state and is taken into account while estimating its trophic status. The water is divided into six hazard classes: TBA < 0.5×10^6 cells/cm³ – I (very clean), TBA = $0.5-1.0 \times 10^6$ cells/cm³ – II (clean), TBA = $1.1-3.0 \times 10^6$ cells/cm³ – III (moderately polluted), TBA = $3.1-5.0 \times 10^6$ cells/cm³ – IV (polluted), TBA = $5.1-10.0 \times 10^6$ cells/cm³ – V (dirty), TBA > 10.0×10^6

Table 2. Pollution levels (PL) and conventional indices of waters pollution IWP(c) in Lake Saysary and Lake Sergelyakh by indicators reaching and exceeding MPC_f and MPC_dr_c/dom at least in one of the lakes.

Hazard class*	Indicator	Lake Saysary				Lake Sergelyakh			
		Ci / MPC_f	PL_f	Ci / MPC_dr_c/dom	PL_dr_c/dom	Ci / MPC_f	PL_f	Ci / MPC_dr_c/dom	PL_dr_c/dom
3	Mg ²⁺	1.25	L	1.00	L	0.35	nd	0.28	L
nn	H	nn	–	1.19	L	Nn	–	0.37	L
nn	Min	nn	–	1.03	L	Nn	–	0.28	L
4	NH ₄ ⁺	4.54	M	1.51	L	1.32	L	0.44	L
3	PO ₄ ³⁻	1.74 (1)	L	0.30	L	0.27 (1)	nd	0.05	L
nn	COD	nn	–	8.13 (2)	H (4)	nn	–	8.85 (2)	H (4)
nn	PMO	nn	–	5.54 (3)	H (4)	nn	–	6.06 (3)	H (4)
3-4*	Fe	2.00	L	<	L	2.50	M	<	L
3	Mn	105	EH	10.5	H	35	H	3.5	M
3-4*	Cu	0.40	nd	<	nd	1.77	L	<	nd
3	V	1.66	L	<	nd	0.85	nd	<	nd
2	Br	<	nd	1.55	L	<	nd	0.39	nd
	IWP(c)	IWP(c)_f		IWP(c)_dr_c/dom		IWP(c)_f		IWP(c)_dr_c/dom	
		16.7		3.42		6.01		2.25	

Notes: nn – no norms; < – an indicator is not taken into account as it is lower than norms for both lakes.

(1) we used for calculation a norm for eutrophic lakes PO₄³⁻ = 0.6 mg/dm³.

(2) we used for calculation a norm of COD = 15 mg O₂ / dm³ for water from surface water sources used for centralized supply to population, for drinking and domestic use, from sites of water intake for swimming pools and balneary.

(3) we used for calculation a norm of PMO = 7 mg O₂ / dm³ for drinking water from non-centralized water supply.

PL – water pollution level by overshooting degree of MPC (RD 52.24.643-2002): L – low (1-2) MPC, M – medium [2-10] MPC; H – high [3-5] MPC for matter of 1-2 hazard classes, [10-50] MPC for matter of 3-4 hazard classes, EH – extremely high ≥ 5 MPC for matter of 1-2 hazard classes, ≥ 50 MPC for matter of 3-4 hazard classes, dash «–» impossible to calculate PL due to norm absence; nd – pollution level is not determined as it is low than MPC.

(4) – criteria of determination of high and extremely high water pollution levels by indicators of COD and PMO are determined by analogy with overshooting degree of MPC of BOD₅: 5-20 MPC – high, > 20 MPC – extremely high.

* - hazard class of chemicals according to (SanPiN 1.2.3685-21) in drinking water from systems of centralized, including hot and non-centralized water supply, in water of underground and surface water bodies for drinking and cultural-domestic water use, in water of swimming pools and fun water parks. For comprehensive estimate of the degree of surface waters pollution by hydrochemical indicators, the hazard class for Fe and Cu is decreased up to 4 (RD 52.24.643-2002).

cells/cm³ – VI (very dirty) (GOST 17.1.3.07-82). Thus, water pollution degree by TBA in Lake Sergelyakh and Lake Saysary meets V and VI hazard classes.

Little abundance of allochthonous microflora supplied into a water body and estimated by indicator of TMC37 occurred in Lake Sergelyakh – 447 CFU / cm³. In Lake Saysary TMC37 was by one order of magnitude lower (33 CFU / cm³). The abundance of autochthonous microflora in Lake Sergelyakh (TMC22 = 14 080 CFU / cm³) also was considerably higher than in Lake Saysary (TMC22 = 323 CFU / cm³). By ratio TMC22 / TMC37 (self-purification coefficient, SPC) one can estimate the activity and state of self-purification in natural water bodies (MUK 4.2.1884-04). By this parameter, water in both lakes meets an accomplished self-purification process (SPC ≥ 4). Despite higher abundance of organotrophic microorganisms in Lake Sergelyakh, self-purification processes in it occurred more intensively (SPC = 31.5) compared to Lake Saysary (SPC = 9.8).

Nevertheless, presence of sanitary indicative bacteria suggested a non-favorable sanitary-microbiological situation, especially in Lake Sergelyakh.

Enterococci were found in Lake Saysary as many as 36 CFU / 100 cm³, this is lower than norms of surface waters used for drinking and domestic water supply as well as for water supply to food enterprises (100 CFU / 100 cm³), however, it is 3.6 higher than norms for surface waters in recreation zones as well as for waters within populated sites (for swimming and aquatic sports) – 10 CFU / 100 cm³ (SanPiN 1.2.3685-21). In Lake Sergelyakh enterococci content was almost by one order of magnitude higher than in Lake Saysary as many as 346 CFU / 100 cm³, this is considerably higher than all norms for surface waters adopted in Russian Federation.

In Lake Saysary a small amount of coliform bacillus *E. coli* (4 CFU / 100 cm³) was found, it did not exceed norms in surface waters for all water usages (100 CFU / 100 cm³) and in natural water for technical water supply (10 CFU / 100 cm³). In Lake Sergelyakh content of *E. coli* was 60 times higher than in Lake Saysary, 240 CFU / 100 cm³, this is 2.4 times higher than adopted norms for surface waters and 24 times higher than norms for natural waters, which can be

used for technical water supply.

Thus, except TBA, by all measured microbiological characteristics, Lake Sergelyakh was by 1-2 orders of magnitude worse than Lake Saysary; this is probably due to absence of sewage tanks in numerous gardening plots, which are closely adjacent to the lake shores (Fig.). During the studied period, water from Lake Sergel'hakh could not be used for drinking and domestic supply as well as for food enterprises, technical and recreation usage. By studied microbiological characteristics, Lake Saysary water could be used for above listed needs except recreational ones.

4. Conclusion

The water from large lakes of Yakutsk City (Lake Saysary and Lake Sergelyakh) in the end of ice-cover period of 2021 did not meet quality norms established for water bodies for fishery, drinking and cultural-domestic water use by numerous hydrochemical, geochemical and microbiological characteristics.

Comprehensive estimate of waters quality by hydrochemical and geochemical indicators obtained using a conventional index of waters pollution *IWP(c)* shows that Lake Saysary water was three times worse than Lake Sergelyakh water by fishery norms and 1.5 times worse by norms for drinking and cultural-domestic water use.

Maximal pollution level in both lakes is found out by Mn (10.5-105 MPC) and organic matter (up to 9 MPC), major part of which, however, is of autochthonous origin. Most probably, high concentrations of Mn are due to seasonal reasons.

By biogenic components (nitrogen, phosphorus) Lake Saysary met the category of dirty and eutrophic water bodies and Lake Sergelyakh – the category of polluted and mesotrophic ones.

Total bacterial pollution in Lake Saysary was also higher (VI hazard class, category of very dirty waters), than in Lake Sergelyakh (V hazard class, category of dirty waters), however, the content of sanitary indicators (*E. coli* and the genus *Enterococcus*) and organotrophic (TMC22, TMC37) bacteria in Lake Sergelyakh was by one and more orders of magnitude higher than in Lake Saysary and exceeded all Russian norms established for surface waters.

The results obtained suggest the necessity to undertake measures for improvement of water quality in Lake Saysary and Lake Sergelyakh as they are situated within Yakutsk City and are of very great amenity and recreational importance. Lake Saysary is included into a list of unique Yakutian lakes and has a sacred meaning.

Acknowledgements

This study was performed using the facilities of the Instrumentation Center for Electron Microscopy and ICP-MS analysis at the Integrated Center of Ultramicroanalysis (Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences). The authors thank I.I. Kopyrin for help in sampling. This study

was supported by the projects No. 121032300186-9 (Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences) and No. 121012190038-0 (Institute for Biological Problems of Cryolithozone, Siberian Branch of the Russian Academy of Science).

Conflict of interests

Hereby the authors state that this research work and manuscript production complied with ethical standards, and none of the authors have any potential conflict of interests.

References

- Alekin O.A. 1953. Fundamentals of hydrochemistry. Leningrad: Hydrometeoizdat [Hydrometeorological Publishing House], 295 pp. (in Russian)
- Aries S., Valladon M., Polve M. et al. 2000. A Routine Method for Oxide and Hydroxide Interference Corrections in ICP-MS Chemical Analysis of Environmental and Geological Samples. *Geostandards Newsletter* 24(1): 19–31. DOI: [10.1111/j.1751-908X.2000.tb00583.x](https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2000.tb00583.x)
- Baram G.I., Vereshchagin A.L., Golobokova L.P. 1999. Application of high-performance microcolumn liquid chromatography with UV detection for the determination of anions in environmental objects. *Analiticheskaya khimiya [Journal of Analytical Chemistry]* 54(9): 962–965 (in Russian)
- Bashenkhaeva M.V., Zakharova Yu.R., Petrova D.P et al. 2015. Sub-ice microalgal and bacterial communities in freshwater Lake Baikal, Russia. *Microbial Ecology* 70: 751–765 DOI: [10.1007/s00248-015-0619-2](https://doi.org/10.1007/s00248-015-0619-2)
- Chebykin E.P., Sorokovikova L.M., Tomberg I.V, et al. 2012. Current State of the Selenga River Waters in the Russian Territory Concerning Major Components and Trace Elements. *Chemistry for Sustainable Development* 20(5): 561–580
- Chebykin E.P., Dambinov Yu.A., Suturin A.N. 2020. Multielemental analysis of above slime waters in the accumulation cells of Baikalsk Pulp and Paper Plant for the choice of territory remediation strategy. *Voda i ekologiya: problema i resheniya [Water and ecology]* 84(4): 67–80. DOI: [10.23968/2305-3488.2020.25.4.67-80](https://doi.org/10.23968/2305-3488.2020.25.4.67-80) (in Russian)
- Cherdonova O.V., Popova N.V. 2022. The ecological state of Lake Saisary and the importance of plankton for the ecosystem of the lake. In: *Strategy and prospects for the development of agrotechnologies and the forest complex of Yakutia until 2050. Collection of scientific articles based on the materials of the All-Russian scientific and practical conference with international participation dedicated to the 100th anniversary of the formation of the Yakut ASSR and the 85th anniversary of the First President of the RS(Ya) M. E. Nikolaev (Nikolaev readings)*. M.: Znanie-M [Knowledge-M], pp. 615-619. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=hgipve> (in Russian)
- Fomin G.S. 2000. Water. Chemical, bacterial and radiation safety control according to international standards. M.: Protektor [Protector], 840 p.
- Gabyshev V.A., Gabysheva O.I. 2020. On study of influence of heavy metals onto the development of phytoplankton in the lakes of Yakutsk City and the surrounding area. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki [Arctic and Subarctic Natural Resources]* 25(4): 81–91. DOI: [10.31242/2618-9712-2020-25-4-6](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-6) (in Russian)
- Gaillardet J., Viers J., Dupre B. 2003. Trace Elements in River Waters. In: Holland H.M. and Turekian K.K. (Eds.), *Treatise on Geochemistry*, vol. 5. Oxford: Elsevier-Pergamon, pp. 225–272. DOI: [10.1016/B978-0-08-095975-7.00507-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00507-6)
- Orbenko Yu.A. 1961. On the most favorable amount of

dry nutrient agar in media for the cultivation of marine microorganisms. *Mikrobiologiya* [Microbiology] 30(1): 168–172 (in Russian)

Gorokhov M. 2023. The population of Yakutsk City has increased by 60 thousand people in five years. *Komsomolskaya Pravda* [Komsomol's Truth] I. Yakutia, April 08, 2023. URL: <https://www.yakutia.kp.ru/online/news/5217118/?ysclid=lu7yjk3zd550642327> (in Russian)

GOST 17.1.3.07-82. 1982. Nature conservation. The hydrosphere. Rules for water quality control of reservoirs and watercourses. The interstate standard. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/29997/?ysclid=lw7i759h1o63072849> (in Russian)

GOST 31942-2012. 2012. Water. Sampling for microbiological analysis. The interstate standard. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/53467/?ysclid=lw92j-8ce1m446660343> (in Russian)

GOST 24849-2014. 2014. Methods of sanitary and biological analysis for field conditions. The interstate standard. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58822/?ysclid=l-who13pwb444456396> (in Russian)

Grigorieva M.V., Solovieva M.I. 2020. The quality of the lakes of Yakutsk City according to the state of benthic communities. *Problemy regional'noy ekologii* [Regional Environmental Issues] 5: 12–16. DOI: [10.24412/1728-323X-2020-5-12-16](https://doi.org/10.24412/1728-323X-2020-5-12-16)

Guidelines for the chemical analysis of land surface waters. Part I. 2009. Rostov-on-Don: Nauka-Obrazovanie-Kul'tura [Science-Education-Culture], 1044 p.

Kaydalova M.V., Olesova A.I. 2019. Lake “Saysary” Yakutsk. In: *Materials of the XI International Student Scientific Conference “Student Scientific Forum 2019”*. Moscow, Moscow State University Science Park. URL: <https://files.scienceforum.ru/pdf/2019/5c6bb00cee22f.pdf>

Kharaev G.I., Yampilov S.S., Tanganov B.B. et al. 2004. Environmental monitoring. Ulan-Ude: East Siberia State University of Thechnology and Management, 77 p. (in Russian)

Kopyrina L.I. 2013. Epiphytic algae are indicators of saprobity of some lakes in the vicinity of Yakutsk City. *Nauka i Obrazovanie* [Science and education] 4: 77–81 (in Russian).

Ksenofontova M.I., Legostaeva Ya.B., Yablovskaya P.E. et al. 2013. Characteristics of the chemical composition of waters and bottom sediments of large reservoirs in Yakutsk City. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Actual problems of the humanities and natural sciences] 4: 493–500 (in Russian)

Legostaeva Ya.B., Rufova A.A. 2022. Analysis of the hydrochemical regime of the largest lakes in the Yakutsk City. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики* [Arctic and Subarctic Natural Resources] 27(4): 572–591. DOI: [10.31242/2618-9712-2022-27-4-572-591](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-572-591) (in Russian)

Makarov V.N., Chizhuk A.L. 2009. The supply of phosphates to the lakes of Yakutsk. *Nauka i Obrazovanie* [Science and education] 4: 67–69 (in Russian)

MUK 4.2.1884-04. 2004. Sanitary-microbiological and sanitary-parasitological analysis of water from surface water bodies. Methodological guidelines. URL: <https://internet-law.ru/stroyka/text/45900/> (in Russian)

Murray R.G.E., Doetsch R.N., Robinow C.F. 1994. Determinative and cytological light microscopy. In: Gerhardt P., Murray R.G.E., Wood W.A., Krieg N.R. (Eds.) *Methods for general and molecular bacteriology*. Washington, DC: American Society for Microbiology, pp. 21–41.

Nikolaev A.A., Arkhipov I.V. 2021. Ecological condition of the lakes in Yakutsk City for tourism and recreational use. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences] 11: 106–113 (in Russian)

Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation of December 13, 2016 No. 552 (as amended on October 12, 2018). 2016. On Approval of Water Quality

Standards for water bodies of fishery importance, including standards for maximum permissible concentrations of harmful substances in the waters of water bodies of fishery importance URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (in Russian)

Perelman A.I. 1982. *Geochemistry of natural waters*. Moscow: Nauka [Science], 154 p. (in Russian)

Pokrovsky O.S., Schott J., Dupre B. 2006. Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil porewaters of permafrost-dominated basaltic terrain in Central Siberia. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70: 3239–3260. DOI: [10.1016/j.gca.2006.04.008](https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.04.008)

Popova N.V., Fedulova S.I. 2022. The study of the water of Lake Saysary according to hydrochemical parameters. In: *Chugunov agronomic readings. Collection of scientific articles based on the materials of the XIV All-Russian Scientific and practical conference of agrotechnological orientation dedicated to the 100th anniversary of the formation of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic and the Year of Cultural Heritage of Peoples in Russia*, pp. 140–144. (in Russian)

Population estimate as of January 1, 2023 by municipal area. The territorial body of the Federal State Statistics Survey for the Republic of Sakha (Yakutia). *SakhaStat* (April 4, 2023). 2023. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A%D0%BA%D1%83%D1%82%D1%81%D0%BA#cite_note-87 (in Russian)

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](https://doi.org/10.4319/lo.1980.25.5.0943)

RD 52.24.643-2002. 2002. A method for the comprehensive assessment of the degree of contamination of surface waters by hydrochemical indicators. The guidance document. Rostov on Don: Roshydromet, 55 p. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/10d/4293831806.pdf> (in Russian)

Rufova A.A., Ksenofontova M.I., Yablovskaya P.E. 2012. Monitoring of the state of the lakes of Yakutsk City by hydrochemical indicators. *Nauka i Obrazovanie* [Science and education] 4: 52–55 (in Russian)

Rufova A.A., Ksenofontova M.I., Trofimova L.N. 2013. The content of some trace elements in the water of Lake Saysary. *Nauka i Obrazovanie* [Science and education] 3: 139–141 (in Russian)

Rufova A.A., Tatarinova A.V. 2015. Anthropogenic influence on the hydrochemical and hydrobiological state of surface waters of northern cities (using the example of Yakutsk City). *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern problems of science and education] 4. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20468> (in Russian)

Rufova A.A., Ksenofontova M.I. 2015. Hydrochemical composition as one of the indicators of modern conditions of lake formation (using the example of Yakutsk City). *Nauka i Obrazovanie* [Science and education] 2: 144–150 (in Russian)

Rufova A.A. 2023. Integral indicators of hydrochemical state of lacustrine waters in Yakutsk City. In: *Actual problems of ecology and nature management. Collection of the XXIV International scientific and practical conference*. 2 volumes. Moscow, p. 323–328

SanPiN 1.2.3685-21. 2021. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans. Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of January 28, 2021 No. 2. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=6560IQ> (in Russian)

Skopintsev B.A. 1950. Organic matter in natural waters (aqueous humus). In: *Trudy Okeanograficheskogo instituta* [Proceedings of the Oceanographic Institute]. Leningrad: Hydrometeoizdat 17(29), 290 p (in Russian)

Skopintsev B.A., Goncharova I.A. 1987. Using the values of the ratios of various indicators of the organic matter of natural waters for its qualitative assessment. In: *Sovremennye problemy regional'noy gidrokhimii* [Modern problems of regional hydrochemistry]. L.: Hydrometeoizdat, pp. 95 – 117. (in Russian)

Suturin A.N., Paradina L.F., Epov V.N. et al. 2003. Preparation and assessment of a candidate reference sample of Lake Baikal deep water. *Spectrochimica Acta Part B* 58: 277 – 88. DOI: [10.1016/S0584-8547\(02\)00157-X](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00157-X)

Suturin A.N., Chebykin E.P., Malnik V.V. et al. 2016. The role of anthropogenic factors in the development of ecological stress in Lake Baikal littoral (the Listvyanka settlement lakescape) *Geography and Natural Resources* 6: 43 – 54 DOI: [10.21782/GIPRO206-1619-2016-6\(43-54\)](https://doi.org/10.21782/GIPRO206-1619-2016-6(43-54)) (in Russian)

Swimming was banned in Lakes Khatyng-Yuryakh and Sergelyakh in Yakutsk. 2021. *Izvestia* [News], July 16, 2021. URL: <https://iz.ru/1194109/2021-07-16/kupanie-zapretili-v-ozerakh-khatyng-iuriakh-i-sergeliakh-v-iakutske> (in

Russian)

Tatarinova A.V., Salova T.A. 2013. Hydrobiological characteristics of urban and suburban lakes of Yakutsk City. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Applied and Fundamental Research] 8-1: 81 – 82. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=3854> (in Russian)

Temporary guidelines for the comprehensive assessment of the quality of surface and marine waters. 1986. The USSR State Committee for Hydrometeorology and Environmental Control. URL: <https://standartgost.ru/g/pkey-14293742635> (in Russian)

Vasilyeva I.I. 1968. Composition and seasonal dynamics of lakes's phytoplankton in the vicinity of Yakutsk City. Cand. Sc. Synopsis of Thesis, Irkutsk, Russia (in Russian)

Wetzel R.G., Likens G.E. 2000. *Limnological analyses*. New York: Springer-Verlag, 391 p.

Оценка качества вод и экологического состояния крупных озер г. Якутска (оз. Сайсары, оз. Сергелях) в конце подледного периода 2021 г

Оригинальная статья
LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Чебыкин Е.П.^{1*}, Мальник В.В.¹, Томберг И.В.¹, Копырина Л.И.², Сутурин А.Н.¹, Захарова Ю.Р.¹

¹ Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

² Институт биологических проблем криолитозоны Сибирского отделения Российской академии наук, проспект Ленина, 41, Якутск, 677980, Россия

АННОТАЦИЯ. Важной экологической проблемой является качество вод водоемов, расположенных вблизи населенных пунктов. В работе использованы гидрохимические, геохимические и микробиологические методы для оценки качества вод озер Сайсары и Сергелях, расположенных в черте города Якутска. На момент исследования вода этих озер не соответствовала нормативам качества, установленным для водных объектов рыбохозяйственного, хозяйственно питьевого и культурно-бытового назначения. Полученные данные обращают внимание на необходимость контроля по ограничению использования вод этих озер для нужд человека и проведения мероприятий по улучшению их качества.

Ключевые слова: оценка качества вод, гидрохимические показатели, микроэлементы, микробиологические показатели, городские озера, Якутск

Для цитирования: Чебыкин Е.П., Мальник В.В., Томберг И.В., Копырина Л.И., Сутурин А.Н., Захарова Ю.Р. Оценка качества вод и экологического состояния крупных озер г. Якутска (оз. Сайсары, оз. Сергелях) в конце подледного периода 2021 г // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 4. - С. 834-863. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-4-834

1. Введение

Якутск – столица республики Саха (Якутия) и один из крупнейших городов России в пределах криолитозоны, численность которого постоянно растёт (Горохов, 2023), также как и его территория, которая достигает 160 км² (Ксенофонтова и др., 2013). На 1 января 2023 г. численность населения города составляла 378,5 тыс. человек (Горохов, 2023; Оценка..., 2023). Город расположен на I и II пойменных террасах центральной части долины Туймаада в среднем течении левобережья р. Лены. Ширина долины в районе г. Якутска достигает 18–20 км, из которых около 8 км приходится на современное русло р. Лены с многочисленными островами, протоками и старичными озерами (Николаев и Архипов, 2021, Попова и Федулова, 2022). На территории города находятся большое количество озер, пять из которых наиболее крупные (Белое, Хатынг-Юрях, Ытык-Кюель, Сергелях, Сайсары). Данные озера относятся к водно-эрози-

онном типе, имеют округлые и удлиненные формы (Ксенофонтова и др., 2013; Легостаева и Руфова, 2022). Городские озера имеют большое культурно-бытовое значение – используются для рекреационных целей и полива огороднических хозяйств (Руфова и др., 2012; Ксенофонтова и др., 2013). В современный период озера испытывают высокую антропогенно-техногенную нагрузку, поскольку на территории города сосредоточены крупные предприятия промышленного, сельскохозяйственного, жилищно-коммунального и топливно-энергетического назначения (Руфова и др. 2012). До начала активного строительства города в 1960-е годы (Макаров и Чижук, 2009; Попова и Федулова, 2022) озера имели хорошую проточную систему, подпитываясь от р. Лены и от малых рек (Шестаковка, Мархинка). В связи с ростом территории города Якутска и ее застройкой проточность большинства озер нарушилась. В связи с этим озера, ранее регулярно очищавшиеся естественным путем, начали загрязняться, цвести, зарастать камышом и мелеть,

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: cheb@lin.irk.ru (Е.П. Чебыкин)

Поступила: 30 мая 2024; **Принята:** 14 июня 2024;

Опубликована online: 30 августа 2024

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



что привело к ухудшению их экологического состояния (Ксенофонтова и др., 2013). С 2011 г. администрацией г. Якутска предпринимаются меры по восстановлению проточности городской озерной системы (Легостаева и Руфова, 2022; Николаев и Архипов, 2021), которые в некоторых случаях привели к улучшению экологической обстановки, например, оз. Сайсары (Чердонова и Попова, 2022). Однако дренажные системы все равно быстро засоряются (Николаев и Архипов, 2021). Из анализа баз данных по химическому составу крупных озер на селитебных территориях следует, что с 1985 г. происходит уменьшение их минерализации, основной вклад в которую вносят более минерализованные речные воды (Легостаева и Руфова, 2022). Из этих же данных следует, что сезонные, а в некоторых случаях и межгодовые, вариации основных гидрохимических характеристик частично определяются речным влиянием. Наряду с этим, антропогенный прессинг фиксируется по многим химическим (Макаров и Чижук, 2009; Руфова и др., 2012; 2013; Ксенофонтова и др., 2013; Руфова и Ксенофонтова, 2015; Руфова и Татарина, 2015, Кайдалова и Олесова, 2019; Габышев и Габышева, 2020; Николаев и Архипов, 2021; Попова и Федулова, 2022; Легостаева и Руфова, 2022; Руфова, 2023) и биологическим (Васильева, 1968; Копырина, 2013; Татарина и Салова, 2013; Руфова и Татарина, 2015; Григорьева и Соловьева, 2020; Габышев и Габышева, 2020; Чердонова и Попова, 2022) компонентам.

Ранее проводили мониторинговые исследования воды оз. Сайсары (2009-2021 гг.) и оз. Сергелях (2009-2014 гг.) в период открытой воды (Макаров и Чижук, 2009; Руфова и др., 2012; 2013; Ксенофонтова и др., 2013; Руфова и Ксенофонтова, 2015; Руфова и Татарина, 2015; Кайдалова и Олесова, 2019; Николаев и Архипов, 2021). В таблице 1 приведены данные о пределах вариаций гидрохимических и геохимических показателей в сопоставлении с их усредненными значениями за период с 1985 по 2021 гг. (Легостаева и Руфова, 2022), рыбохозяйственными нормативами (Приказ..., 2016) и нормативами для вод хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения (СанПиН 1.2.3685-21).

Данных по микробиологическим характеристикам воды оз. Сайсары и оз. Сергелях, опубликованных в научной литературе, нами не обнаружено. В сети интернет есть сообщения Роспотребнадзора о запрете купания в оз. Сергелях из-за превышения норм санитарно-эпидемиологических показателей (Купание..., 2021).

Ранее анализ качества вод озер г. Якутска проводили в период открытой воды. Однако большую часть года, восемь месяцев, эти озера покрыты льдом. Постоянный ледовый покров устанавливается с конца сентября – начала октября, таяние льда начинается в середине мая, полностью ледяной покров сходит в конце мая или в начале июня (Николаев и Архипов, 2021).

С целью определения качества вод и экологического состояния озер Сайсары и Сергелях в ледо-

вый период проведен комплексный анализ водных проб, отобранных в конце апреля – начале мая 2021 г. В работе впервые представлены результаты микробиологических исследований (общая численность микроорганизмов – ОЧМ, общее микробное число при 22°C (ОМЧ22) и 37°C (ОМЧ37), *Escherichia coli* и бактерии рода *Enterococcus*) воды этих озер, расширенного геохимического анализа воды (66 химических элементов) и дополнительных гидрохимических показателей (концентрация общего и органического фосфора, перманганатная окисляемость).

2. Материалы и методы

2.1. Описание района исследований

Оз. Сайсары

Одним из наиболее изученных является оз. Сайсары, которое расположено в южной части города (Рис.), входит в список уникальных озер Якутии и является сакральным в истории и легендах якутского народа как прародина народа саха (Николаев и Архипов, 2021). В зимнее время озеро активно используется горожанами для лыжных прогулок, весной – для катания на коньках, проведения массовых праздников (Николаев и Архипов, 2021). Котловина озера находится на II надпойменной террасе и относится к эрозионно-антропогенному генетическому типу (Кайдалова и Олесова, 2019; Чердонова и Попова, 2022; Попова и Федулова, 2022). Питание осуществляется в основном атмосферными осадками (Кайдалова и Олесова, 2019; Попова и Федулова, 2022). Озеро имеет размеры: длина – 1,4 км, средняя ширина – 0,35 км, максимальная ширина – 0,47 км, площадь зеркала воды – 0,49 км², средняя глубина – 2,65 м, максимальная – 6 м; объем озера оценивается в 1,23 млн м³ (Легостаева и Руфова, 2022). Высота снежного покрова оз. Сайсары составляет 0,38 м, средняя толщина льда – 1,3 м (Николаев и Архипов, 2021). В последние годы сильно возросло влияние антропогенных факторов на водоем, отмечается большое уменьшение площади зеркала воды за счет отсыпки берегов под строительство, прокладки канализационного коллектора и сброса строительных и бытовых отходов (Руфова и др., 2013).

Оз. Сергелях

Оз. Сергелях расположено южнее оз. Сайсары (Рис.) и связано с ним через трубы и канал (Чердонова и Попова, 2022). Оз. Сергелях имеет узкую извилистую форму. Общая длина озера по разным оценкам составляет от 6 (Легостаева и Руфова, 2022) до 8 км (Ксенофонтова и др., 2013), средняя ширина 0,08 км, максимальная – 0,15 км, площадь зеркала воды 0,47 км², объем воды 0,42 млн м³, средняя глубина озера 0,88 м, а максимальная – 2 м (Легостаева и Руфова, 2022). По космоснимкам (программа SASPlanet с открытым доступом) длина главной части единого водного тела составляет 8 км 300 м, имеются также боковые ответвления общей протяженностью 1,5 км.

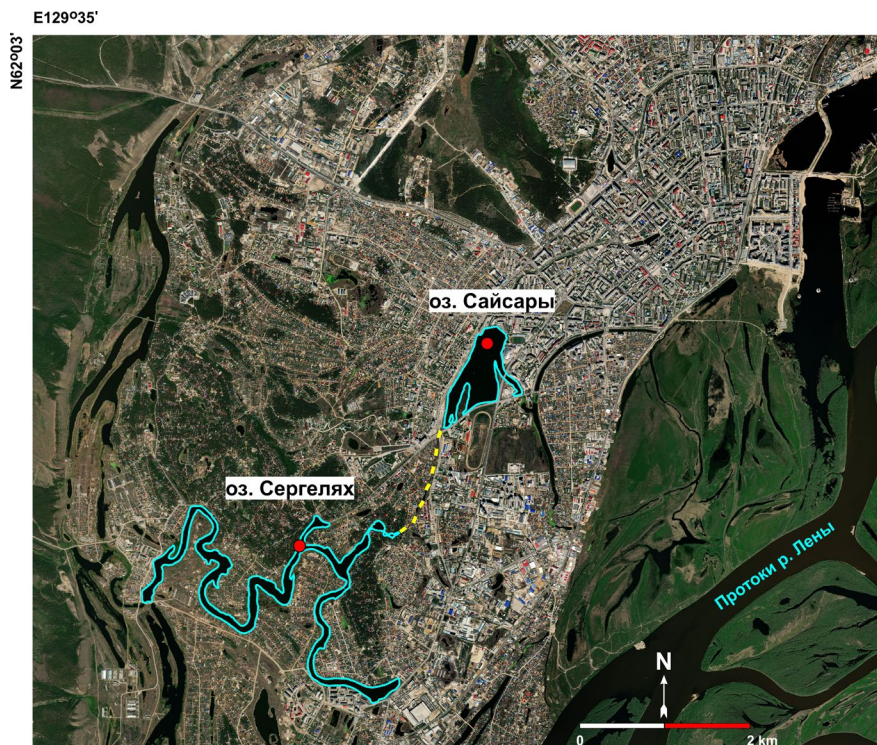


Рис. Озёрно-речная сеть г. Якутска. Станции отбора проб показаны красными кружками. Жёлтой пунктирной линией показан канал, связывающий оз. Сергелях с оз. Сайсары. Космоснимок взят из открытых источников (ресурс SASPlanet).

2.2. Отбор проб

Пробы воды отобрали в конце подледного периода 2021 г. – 21 апреля из оз. Сайсары (N 62° 01'10.0», E 129°41'38.6») и 04 мая из оз. Сергелях (N 61° 59'53.7», E 129°39'07.3») (Рис.). Толщина снега на оз. Сайсары составляла 32 см, толщина льда – 105 см, глубина воды – 4 м, на оз. Сергелях – 0,5 см, 105 см и 1,5 м соответственно. Пробы воды отобрали батометром Нискина (объёмом 2 дм³) с глубины 1 м (от нижней поверхности льда).

Для гидрохимического анализа образцы воды разливали в 1,5 л ПЭТ бутылки. Для определения биогенных компонентов и органического вещества бутылки замораживали, для определения остальных гидрохимических показателей бутылки хранили в холодильнике. Определение pH проводили через несколько часов после отбора проб.

Для многоэлементного ИСП-МС анализа пробы воды отобрали из батометра одноразовыми медицинскими шприцами объёмом 10 мл. Образцы сразу же фильтровали через одноразовые полистирольные стерильные шприц-насадки Minisart 16555-K (размер пор 0,45 мкм, ацетат целлюлозы, Sartorius Stedim Biotech GmbH, Германия) в предварительно взвешенные полипропиленовые пробирки Эппендорфа (2 мл, Axugen Scientific, Cat.-No. MCT-200-C, США, Мексика), содержащие 40 мкл консерванта. В качестве консерванта использовали 70 % HNO₃, дважды очищенную с помощью суббуйлинговой системы перегонки кислот (Savillex DST-1000 sub-boiling distillation system, Япония). В азотную кислоту, в качестве внутреннего стандарта был добавлен индий (1008 ppb). Консервант добавляли в пробирки Эппендорфа весовым методом. Пробирки

с образцами воды взвешивали в лабораторных условиях и рассчитывали точное содержание азотной кислоты (типично 2 %) и индия (типично 30 ppb). Все необходимые взвешивания проводились на аналитических весах Mettler Toledo AG104 (погрешность взвешивания ± 0,0003 г).

Для микробиологического анализа пробы воды отобрали из батометра в новые пластиковые бутылки объёмом 0,5 л в двух повторностях. Время с момента отбора проб до проведения микробиологического анализа не превышало 6 часов в соответствии с (ГОСТ 31942-2012).

2.3. Гидрохимический анализ

Определение химического состава выполняли по методикам, общепринятым в гидрохимии пресных вод (Барам и др., 1999; Фомин, 2000; Wetzel and Likens, 2000; Руководство..., 2009). Для измерения величины pH использовали pH-метр с комбинированным электродом и термокомпенсатором «Эксперт-001» (Россия). Содержание общего азота, фосфора и органического вещества определяли в нефилтрованных пробах, а биогенных элементов и основных ионов в пробах, профильтрованных через мембранные фильтры с диаметром пор 0,45 мкм. Концентрации биогенных элементов измеряли на спектрофотометре «UNICO-2100» (США): нитриты – с реактивом Грисса, нитраты – с салициловокислым натрием, аммонийный азот – индофенольным методом, фосфаты – методом Дениже-Аткинса с хлористым оловом в качестве восстановителя. Для определения кремнекислоты использован спектрофотометрический метод, основанный на измере-

Таблица 1. Гидрохимические, геохимические и микробиологические характеристики оз. Сайсары и оз. Сергелях по литературным источникам в сопоставлении с нормативами и нашими данными. Жирным шрифтом выделены значения, превышающие рыбохозяйственные нормативы (ПДК_{р/х}), жирным шрифтом с подчеркиванием – нормативы для вод хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения (ПДК_{х/п_к/б})

Характеристика	ПДК _{р/х}	ПДК _{х/п_к/б}	оз. Сайсары, мин-макс (2009-2021 гг.)	оз. Сайсары, усредненная (1985-2021 гг.)	оз. Сайсары, ЛИН СО РАН (21.04.2021)	оз. Сергелях, мин-макс (2009-2014 гг.)	оз. Сергелях, усредненная (1985-2021 гг.)	оз. Сергелях, ЛИН СО РАН (04.05.2021)
Литературный источник	(Приказ..., 2016)	(СанПиН 1.2.3685-21)	Список работ в примечании*	(Легостаева и Руфова, 2022)	эта работа	Список работ в примечании*	(Легостаева и Руфова, 2022)	эта работа
рН	фоновые	6-9	7,9-8,6 (2009-2012 гг.)	8,34	7,23	7,64-8,58	8,34	6,78
Ca ²⁺ , мг/дм ³	180	ну	17-40 (2009-2014, 2021 гг.)	27,4	82,4	22-42	25,44	28,4
Mg ²⁺ , мг/дм ³	40	50	10- 55 (2009-2014, 2021 гг.)	30,3	50	8-30	21,21	14,1
Na ⁺ , мг/дм ³	120	200	40- 125 (2009-2014 гг.), 335 (Na+K, 2021 г.)	77,6	117	22-45	47,42	24,8
K ⁺ , мг/дм ³	10 / 50 ⁽¹⁾	ну	5-8 (2009-2014 гг.)	6,51	16,5	~2-5	5,84	5,52
HCO ₃ ⁻ , мг/дм ³	ну	ну	165-313 (2009-2014 гг.), 540 (2021 г.)	262	577	140-279	203,33	170
Cl ⁻ , мг/дм ³	300	350	20- > 300	83,8	174	<10-90	32,36	26
SO ₄ ²⁻ , мг/дм ³	100	500	нд	21,1	13,5	нд	14,07	10,0
Ж, мг-экв/дм ³	ну	7 / 10 ⁽²⁾	< 4- 20	4,04	8,3	1,5- 8	3,27	2,6
Мпн, мг/дм ³	ну	1000 / 1500 ⁽²⁾	180- 1246	479	1030	250-420	308,95	279
NH4 ⁺ , мг/дм ³	0,5	1,5	0,2- 3,4	0,63	2,27	~0- 1,6	0,35	0,66
NO ₂ ⁻ , мг/дм ³	0,08	3	0,02- 3,2	0,13	0,003	< 0,05	0,03	0,046
NO ₃ ⁻ , мг/дм ³	40	45	0-2,2	1,16	0,41	< по	0,13	1,22
PO ₄ ³⁻ , мг/дм ³	0,15 / 0,45 / 0,6 ⁽³⁾	3,5	0,07- 0,76	0,44	1,04	< по- 2,4	0,33	0,162
P _{общ} , мг/дм ³	нд	нд	нд	нд	0,53	нд	нд	0,228
P _{орг} , мг/дм ³	нд	нд	нд	нд	0,19	нд	нд	0,175
XПК, мг O ₂ /дм ³	ну	15 / 30 / 60 ⁽⁴⁾	<15- 150	нд	122	нд	нд	132,7
БПК ₅ , мг O ₂ /дм ³	2,1	2 / 4 ⁽⁵⁾	<2,1- 7,1	нд	нд	нд	нд	нд
ПМО, мг O ₂ /дм ³	ну	5 / 7 / 7,5 ⁽⁶⁾	нд	нд	нд	нд	нд	нд
O ₂ -раств, мг/дм ³	> 4 / > 6 ⁽⁷⁾	> 4	< 4-10	нд	нд	> 6	нд	нд
ВВ, мг/дм ³	к фону + 0,25-0,75 / + 5% при > 30 в > 30 в межень ⁽⁸⁾	к фону + 0,75 / + 5% при > 30 в межень ⁽⁹⁾	<2-8	6,06	нд	2-13	6,41	нд
F ⁻ , мкг/дм ³	к фону + 50 / 750 (макс) ⁽¹⁰⁾	к фону + 50 / 750 (макс) ⁽¹⁰⁾	< по	310	нд	< по	250	нд
Fe, мкг/дм ³	100	300	<100- 1200	390	200	<100- 850	270	250
Mn, мкг/дм ³	10	100	0,8- > 500	20	1050	6-29	20	350
Zn, мкг/дм ³	10	1000	<10- 390	120	0,83	< по- 490	20	5,1

Характеристика	ПДК_р/х	ПДК_х/п_к/б	оз. Сайсары, мин-макс (2009-2021 гг.)	оз. Сайсары, усредненная (1985-2021 гг.)	оз. Сайсары, ЛИН СО РАН (21.04.2021)	оз. Сергелях, мин-макс (2009-2014 гг.)	оз. Сергелях, усредненная (1985-2021 гг.)	оз. Сергелях, ЛИН СО РАН (04.05.2021)
Cu, мкг/дм ³	1	1000	<1-11,7	1	<0,4	1,5-2,3	1	1,77
Pb, мкг/дм ³	6	10	1,4-22,2	4	0,025	4,9-6,8	10	0,115
St, мкг/дм ³	400	7000	нд	260	720	нд	150	170
Va, мкг/дм ³	740	700	нд	2	89	нд	20	32
Co, мкг/дм ³	10	100	<по	8	0,3	<по	5	0,23
Cr, мкг/дм ³	20	50	<по	4	0,77	<по	3	0,49
Mo, мкг/дм ³	1	70	нд	4	0,1	нд	2	0,91
Li, мкг/дм ³	80	30	<по	<по	10,6	<по	20	2,9
Ni, мкг/дм ³	10	20	<по	<по	3,9	<по	<по	1,69
As, мкг/дм ³	50	10	<по	<по	1,9	<по	<по	0,84
Cd, мкг/дм ³	5	1	<по	нд	0,0016	<по	нд	0,01
Hg, мкг/дм ³	0,01	0,5	<по	<по	<0,02	<по	<по	<0,02
Be, мкг/дм ³	0,3	0,2	нд	нд	0,011	нд	нд	0,005
B, мкг/дм ³	500	500	нд	нд	122	нд	нд	14,3
Al, мкг/дм ³	40	200	нд	нд	5,1	нд	нд	18,7
Si, мкг/дм ³	ну	10000	нд	нд	1760	нд	нд	1590
Sc, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	<0,125 ⁽¹⁴⁾	нд	нд	<0,073 ⁽¹⁴⁾
Ti, мкг/дм ³	60	100	нд	нд	1,14	нд	нд	0,76
V, мкг/дм ³	1	100	нд	нд	1,66	нд	нд	0,85
Ga, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,009	нд	нд	0,017
Ge, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,015	нд	нд	0,0019
Se, мкг/дм ³	2	10	нд	нд	0,33	нд	нд	0,05
Br, мкг/дм ³	1350	200	нд	нд	310	нд	нд	77
Rb, мкг/дм ³	100	70	нд	нд	4,2	нд	нд	2,9
Y, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,103	нд	нд	0,072
Zr, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,3	нд	нд	0,16
Nb, мкг/дм ³	ну	10	нд	нд	0,039	нд	нд	0,014
Ag, мкг/дм ³	ну	50	нд	нд	0,0006	нд	нд	<0,0004
Sn, мкг/дм ³	112	ну	нд	нд	0,012	нд	нд	0,014
Sb, мкг/дм ³	ну	5	нд	нд	0,18	нд	нд	0,2
Te, мкг/дм ³	3	10	нд	нд	<0,008	нд	нд	<0,008
I, мкг/дм ³	400	125	нд	нд	35	нд	нд	10,3

Характеристика	ПДК _{р/х}	ПДК _{х/п_к/б}	оз. Сайсары, мин-макс (2009-2021 гг.)	оз. Сайсары, усредненная (1985-2021 гг.)	оз. Сайсары, ЛИН СО РАН (21.04.2021)	оз. Сергелях, мин-макс (2009-2014 гг.)	оз. Сергелях, усредненная (1985-2021 гг.)	оз. Сергелях, ЛИН СО РАН (04.05.2021)
Cs, мкг/дм ³	1000	ну	нд	нд	0,0021	нд	нд	0,0024
La, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,074	нд	нд	0,075
Se, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,125	нд	нд	0,134
Rr, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,014	нд	нд	0,017
Nd, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,07	нд	нд	0,059
Sm, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,023	нд	нд	0,021
Eu, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,008 ⁽¹⁵⁾	нд	нд	0,0025 ⁽¹⁵⁾
Gd, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,013	нд	нд	0,014
Tb, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,0022	нд	нд	0,002
Dy, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,012	нд	нд	0,009
Ho, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,0034	нд	нд	0,0028
Er, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,01	нд	нд	0,008
Tm, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,0014	нд	нд	0,0011
Yb, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,008	нд	нд	0,006
Lu, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,0019	нд	нд	0,001
Hf, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,006	нд	нд	0,003
Ta, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,0013	нд	нд	0,0009
W, мкг/дм ³	0,8	50	нд	нд	0,007	нд	нд	0,029
Re, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,0009	нд	нд	0,0007
Tl, мкг/дм ³	ну	0,1	нд	нд	<0,001	нд	нд	<0,001
Bi, мкг/дм ³	ну	100	нд	нд	0,0031	нд	нд	0,0029
Tb, мкг/дм ³	ну	ну	нд	нд	0,0067	нд	нд	0,02
U, мкг/дм ³	ну	15	нд	нд	1,1	нд	нд	1,2
ОЧМ, кл/см ³	ну	ну	нд	нд	14,6 × 10 ⁶	нд	нд	6,4 × 10 ⁶
ОМЧ22, КОЕ/см ³	ну	ну	нд	нд	323	нд	нд	14080
ОМЧ37, КОЕ/см ³	ну	50 / 100 ⁽¹¹⁾	нд	нд	33	нд	нд	447
Энтерококки, КОЕ/100 см ³	ну	0 / 100 / 10 / ну ⁽¹²⁾	нд	нд	36	нд	нд	346
<i>E. coli</i> , КОЕ/100 см ³	ну	0 / 100 / 100 / 10 ⁽¹³⁾	нд	нд	4	нд	нд	240

Примечания: ну – нормативы не установлены; нд – нет данных; < по – ниже пределов обнаружения методов измерения; Ж – жесткость; Мин – минерализация (сумма главных ионов); ВВ – взвешенные вещества.

(1) Концентрация калия не более 10 мг/дм³ для водоемов с минерализацией до 100 мг/дм³.

(2) Вода питьевая централизованного водоснабжения: Мин – не более 1000 мг/дм³; Ж – не более 7 мг-экв/дм³; вода питьевая нецентрализованного водоснабжения: Мин – не более 1500 мг/дм³; Ж – не более 10 мг-экв/дм³.

- (3) Фосфаты $< 0,15 \text{ мг/дм}^3$ – олиготрофные, $0,15-0,45 \text{ мг/дм}^3$ – мезотрофные, $> 0,6 \text{ мг/дм}^3$ – эвтрофные водоемы.
- (4) ХПК не должно превышать $15,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ в воде поверхностных водоемчиков, используемых для централизованного водоснабжения населения, для хозяйственно-бытового водопользования, в местах водозабора для плавательных бассейнов, водолечебниц, ХПК не должно превышать $30,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ в воде поверхностных водоемчиков, используемых для рекреационного водопользования, а также в черте населенных мест, в открытых системах технического водоснабжения и для полива улиц и зеленых насаждений. ХПК не должно превышать $60,0 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ в системах технического оборотного водоснабжения ручных и автоматических моек автомобильного транспорта.
- (5) БПК₅ не должно превышать $2 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ в воде поверхностных водоемчиков, используемых для централизованного водоснабжения населения, для хозяйственно-бытового водопользования, в местах водозабора для плавательных бассейнов, водолечебниц, БПК₅ не должно превышать $4 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ в воде поверхностных водоемчиков, используемых для рекреационного водопользования, а также в черте населенных мест. БПК₅ не должно превышать $5 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ в открытых системах технического водоснабжения и для полива улиц и зеленых насаждений. БПК₅ не должно превышать $10 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ в системах технического оборотного водоснабжения ручных и автоматических моек автомобильного транспорта.
- (6) ПМО должно быть не более $5 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$ в воде питьевой централизованного водоснабжения, не более $7 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$ в воде питьевой централизованного водоснабжения, не более $7,5 \text{ мг O}_2/\text{дм}^3$ в воде аквапарков.
- (7) Содержание растворенного кислорода в воде должно быть не менее $4 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ – зимой, не менее $6 \text{ мгO}_2/\text{дм}^3$ – летом.
- (8) Содержание взвешенных веществ при сбросе возвратных (сточных) вод конкретным водопользователем, при производстве работ на водном объекте и в прибрежной зоне в контрольном створе (пункте) не должно увеличиваться по сравнению с естественными условиями более чем на $0,25 \text{ мг/дм}^3$ (для высшей и первой категорий водного объекта рыбохозяйственного значения) или более чем на $0,75 \text{ мг/дм}^3$ (для второй категории водного объекта рыбохозяйственного значения). В водных объектах рыбохозяйственного значения при содержании в межень более 30 мг/дм^3 природных взвешенных веществ допускается увеличение содержания их в воде в пределах 5%. Возвратные (сточные) воды, содержащие взвешенные вещества со скоростью осаждения более $0,4 \text{ мм/с}$, запрещается сбрасывать в водотоки, при скорости осаждения более $0,2 \text{ мм/с}$ – в водоемы.
- (9) Содержание взвешенных веществ при сбросе сточных вод, производств работ на водном объекте и в прибрежной зоне в контрольном створе (пункте) не должно увеличиваться по сравнению с естественными условиями более чем на $0,25 \text{ мг/дм}^3$ для рекреационного водопользования, а также в черте населенных мест – более чем на $0,75 \text{ мг/дм}^3$. Для водных объектов, содержащих в межень более 30 мг/дм^3 природных взвешенных веществ, допускается увеличение их содержания в воде в пределах 5%. Взвеси со скоростью выпадения более $0,4 \text{ мм/с}$ для проточных водоемов и более $0,2 \text{ мм/с}$ для водохранилищ к спуску запрещаются. Для технической воды в открытых системах технического водоснабжения и для полива улиц и зеленых насаждений содержание взвешенных веществ не должно превышать $5,0 \text{ мг/дм}^3$, а для технической воды в системах технического оборотного водоснабжения ручных и автоматических моек автомобильного транспорта – $20,0 \text{ мг/дм}^3$ ($60,0 \text{ мг/дм}^3$ – для колесных моек автотранспорта).
- (10) Содержание фторидов должно быть не более 50 мг/дм^3 в дополнение к фоновому, но не выше их суммарного содержания 750 мг/дм^3 .
- (11) ОМЧ37 должно быть не более 50 КОЕ/см^3 для систем централизованного питьевого и горячего водоснабжения, не более 100 КОЕ/см^3 для систем нецентрализованного питьевого водоснабжения.
- (12) Энтрококки должны отсутствовать в воде систем централизованного питьевого и горячего водоснабжения и нецентрализованного питьевого водоснабжения, а также в воде бассейнов и аквапарков; в поверхностных водах для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, а также для водоснабжения пищевых предприятий – не более $100 \text{ КОЕ} / 100 \text{ см}^3$; в зонах рекреации, а также в черте населенных мест (для купания и занятия водным спортом) – не более $10 \text{ КОЕ} / 100 \text{ см}^3$; в природных водах для технического водоснабжения – норматив не установлен.
- (13) *E. coli* должны отсутствовать в воде систем централизованного питьевого и горячего водоснабжения и нецентрализованного питьевого водоснабжения, а также в воде бассейнов и аквапарков; в поверхностных водах для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, а также для водоснабжения пищевых предприятий – не более $100 \text{ КОЕ} / 100 \text{ см}^3$; в зонах рекреации, а также в черте населенных мест (для купания и занятия водным спортом) – не более $100 \text{ КОЕ} / 100 \text{ см}^3$; в природных водах для технического водоснабжения (автомойки, полив улиц и зеленых насаждений) – не более $10 \text{ КОЕ} / 100 \text{ см}^3$.
- (14) Концентрация Sc может быть повышена из-за сложностей учета интерференций с SiO (определение методом ИСП-МС).
- (15) Концентрация Eu может быть повышена из-за сложностей учета интерференций с BaO (определение методом ИСП-МС).
- * (Макаров и Чижук, 2009) – PO_4^{3-} ;
 (Руфова и др., 2012) – pH, жесткость, общая минерализация, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , F, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Co, Cr, Ni, Cd;
 (Руфова и др., 2013) – NH_4^+ , Fe, Mn, Zn, Pb;
 (Ксенофонтова и др., 2013) – pH, жесткость, O_2 -раств, взвешенные вещества; NH_4^+ , Fe, Mn, Zn, Cu;
 (Руфова и Ксенофонтова, 2015) – pH, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K⁺, HCO_3^- , Cl⁻, жесткость, общая минерализация, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , PO_4^{3-} , Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Co, Cr, Ni, As, Cd, Hg;
 (Руфова и Татарина, 2015) – Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K⁺, NO_3^- , F, Fe, Pb, Co, Cr, Ni, As, Cd, Hg;
 (Руфова и Олесова, 2019) – Mg^{2+} , Na^+ , Cl⁻, жесткость, общая минерализация, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , ХПК, БПК₅, O_2 -раств, Fe, Mn, Zn, Cu, Pb, Co, Ni, Hg;
 (Кайдалова и Николаев, 2021) – Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K⁺, HCO_3^- , Cl⁻, жесткость, общая минерализация, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , БПК₅, O_2 -раств, Fe;
 (Николаев и Архипов, 2021) – Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K⁺, HCO_3^- , Cl⁻, жесткость, общая минерализация, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , БПК₅, O_2 -раств, Fe;
 (Легостаева и Руфова, 2022) – минерализация, взвешенные вещества, усредненные гидрхимические и геохимические характеристики.

нии интенсивности окраски желтой кремнемолибденовой гетерополикислоты. Содержание общего фосфора и азота измеряли после высокотемпературного персульфатного окисления на спектрофотометре, содержание органических веществ оценивали по перманганатной (ПМО) и бихроматной окисляемости (ХПК). Концентрацию ионов HCO_3^- , Cl^- и SO_4^{2-} определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии с непрямой УФ-детекцией («Милюхром А-О2», Россия), ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} – абсорбционным, а Na^+ и K^+ – пламенно-эмиссионным методом («AAS-30», Германия).

2.4. Многоэлементный ИСП-МС анализ

Подготовленные пробы воды измеряли на квадрупольном ИСП-МС масс-спектрометре Agilent 7500 се в ЦКП «Ультрамикрoанализ» ЛИН СО РАН в соответствии с разработанными ранее подходами (Чебыкин и др., 2012; 2020). Система ввода проб: боросиликатный распылитель MicroMist (режим подачи растворов – самораспыление ~ 200 мкл/мин), PFA распылительная камера Скотта, кварцевая горелка с рубиновым инжектором и с системой ShieldTorch. Измерения проводили в режиме «горячей плазмы» (мощность генератора плазмы 1580 Вт) без столкновительной ячейки.

Растворы измерялись в сканирующем режиме с дополнительным заглублением сигналов в 30 раз для изотопов ^{23}Na , ^{27}Al , ^{28}Si , ^{39}K и ^{115}In (3 канала на массу, 0,05 с на канал, общее время сканирования масс-спектра – 62 с, промывка между пробами – 60 с).

Для калибровки масс-спектрометра использовали многоэлементные стандартные растворы ICP-MS-68A-A и ICP-MS-68A-B (HIGH-PURITY STANDARDS, Charleston, USA), образец байкальской бутылкированной воды (для Na, Mg, Si, S, Cl, K, Ca, (Suturin et al., 2003)), а также растворы катионов (Na, Mg, K, Ca, Fe, Hg) и анионов (Si, P, S, Cl, Br, I), приготовленные смешением одноэлементных ИСП-МС стандартных растворов компании Inorganic Ventures (США)

Корректировку на интерферирующие молекулярные ионы (MeO^+ , MeOH^+ , MeAr^+ , MeCl^+) проводили с использованием подхода, описанного в работе (Aries et al., 2000).

Типичные ошибки измерения (коэффициент вариации RSD), в зависимости от концентрации химических элементов находятся в следующих диапазонах: $< 0,001 \text{ мкг/дм}^3$ – RSD $> 25 \%$; $0,001-0,1 \text{ мкг/дм}^3$ – RSD 25-10 %; $0,1-1 \text{ мкг/дм}^3$ – RSD 10-5 %; $> 1 \text{ мкг/дм}^3$ – RSD 5 %.

2.5. Микробиологический анализ

Общую численность микроорганизмов (ОЧМ) учитывали методом прямого счета препаратов, окрашенных красителем ДАФИ (4,6-диамидино-2-фенилиндол) (Porter and Feig, 1980), с использованием эпифлуоресцентного микроскопа (Axiovert 200 Zeiss, Германия) с ультрафиолетовой лампой HBO

50W/AC ASRAM при спектре возбуждения 365 нм (Bashenkhaeva et al., 2015). При подсчете клеток просматривали не менее 30 полей зрения на объектив, расчеты проводили по рекомендованной формуле (Murray et al., 1994).

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) (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 (ОМЧ37). Коэффициент самоочищения (КСО) определяли по соотношению значений показателя ОМЧ, определенных при температурах 22 °C и 37 °C.

Санитарно-микробиологические показатели определяли в соответствии (СанПиН 1.2.3685-21). Обнаружение и подсчет исследуемых групп бактерий проводили, используя метод мембранной фильтрации на нитроцеллюлозных фильтрах с диаметром пор 0.45 мкм в соответствии с (МУК 4.2.1884-04) и (ГОСТ 24849-2014). Численность термотолерантных *E. coli* определялась методом мембранной фильтрации с использованием селективного Хай-хром агара (производство «Himedia» № M1571) (ГОСТ 24849-2014).

Присутствие фекальных энтерококков выявляли методом мембранной фильтрации с использованием питательного селективного агара Slanetz and Bartley Medium (производство «Himedia» № M 612) и Bile Esculine Azide Agar (производство «Himedia» № M493) (ГОСТ 24849-2014). Анализ результатов проводили согласно (МУК 4.2.1884-04, ГОСТ 24849-2014).

3. Результаты и обсуждение

3.1. pH, состав главных ионов

В период исследования вода обоих озер имела слабощелочную реакцию, и, по классификации Алекина (Алекин, 1953), соответствовала гидрокарбонатному классу (Таблица 1). Среди катионов в воде обоих озер преобладали Ca^{2+} и Na^+ . В оз. Сайсары концентрация Na^+ (117 мг/дм^3) немного больше чем Ca^{2+} ($82,4 \text{ мг/дм}^3$), а в оз. Сергелях, наоборот, концентрация Ca^{2+} ($28,4 \text{ мг/дм}^3$) немного больше чем Na^+ ($24,8 \text{ мг/дм}^3$). В оз. Сайсары концентрация главных ионов, за исключением SO_4^{2-} превышала усредненные характеристики, полученные за период 1985-2021 гг. (Легостаева и Руфова, 2022) (далее будем использовать термин «характерные значения») в 1,5-3 раза, а общая минерализация (1030 мг/дм^3) – в ~ 2 раза. Концентрация K^+ , Ca^{2+} и HCO_3^- в оз. Сайсары превышала максимальные значения, наблюдавшиеся в период открытой воды в 2009-2021 гг. (диапазон вариаций характеристик для доступного периода наблюдений далее будем называть «мониторинговые значения»). Это может

указывать как на более интенсивную подпитку подземными и речными водами в зимний период по сравнению с атмосферной влагой, так и на вклад антропогенных факторов (Руфова и др. 2012), стоки которых могут попадать в озеро с грунтовыми водами (Макаров и Чижук, 2009).

Минерализация оз. Сайсары (1030 мг/дм³) немного превышала предельно допустимые концентрации (ПДК) для питьевой воды централизованного водоснабжения (1000 мг/дм³), но была меньше ПДК для питьевой воды нецентрализованного водоснабжения (1500 мг/дм³) (СанПиН 1.2.3685-21). Среди главных ионов концентрация Mg²⁺ (50 мг/дм³) в оз. Сайсары достигала ПДК вод хозяйственно питьевого и культурно-бытового назначения (ПДК_{х/п.к/б}) и превышала рыбохозяйственные нормативы (1,25 ПДК_{р/х}). Жесткость воды в оз. Сайсары (8,3 мг-экв/дм³) в 1,2 раза превышала ПДК для питьевой воды централизованного водоснабжения (7 мг-экв/дм³), но была меньше ПДК для питьевой воды нецентрализованного водоснабжения (10 мг-экв/дм³).

Оз. Сергелях более пресное, минерализация воды (сумма главных ионов) в нем составляла 279 мг/дм³, что в 3,7 раза ниже, чем в оз. Сайсары (Таблица 1). Концентрация главных ионов в оз. Сергелях была в 1,5-2 раза ниже характерных значений, что может указывать на другой характер гидрологического режима озера по сравнению с оз. Сайсары. Концентрация K⁺ в оз. Сергелях немного превышала максимальные мониторинговые значения, наблюдаемые в период открытой воды в 2009-2014 гг.

3.2. Биогенные компоненты

Наибольшая концентрация аммония (NH₄⁺ = 2,27 мг/дм³), превышающая оба норматива (4,5 ПДК_{р/х} (Приказ..., 2016) и 1,5 ПДК_{х/п.к/б} (СанПиН 1.2.3685-21)) была обнаружена в оз. Сайсары (Таблица 1). В оз. Сергелях концентрация аммония (NH₄⁺ = 0,66 мг/дм³) превышала рыбохозяйственные нормативы в 1,3 раза.

Согласно классификации степени загрязненности водоемов по содержанию аммонийного азота (в мг/дм³): очень чистые (< 0,05), чистые (0,05-0,1), умеренно загрязненные (0,2-0,3), загрязненные (0,4-1,0), грязные (1,1-3,0) и очень грязные (> 3,0), (Хараев и др., 2004), оз. Сайсары попадает в категорию «грязные», а оз. Сергелях – в категорию «загрязненные». Полученные концентрации аммония в оз. Сайсары близки к максимальным мониторинговым значениям (3,4 мг/дм³) и в 3,6 раз выше характерных значений (0,63 мг/дм³). В оз. Сергелях концентрация аммония в 2,4 раза ниже максимальных мониторинговых значений (1,6 мг/дм³), однако почти в два раза выше характерных значений (0,35 мг/дм³) (Таблица 1).

Концентрация продуктов окисления аммония (NO₂⁻; NO₃⁻) в оз. Сайсары меньше, чем в оз. Сергелях (Таблица 1). Это указывает на то, что оз. Сайсары

подвергается более интенсивному свежему фекальному загрязнению.

Концентрация нитритов и нитратов в обоих озерах была ниже установленных нормативов. Концентрация нитритов в оз. Сайсары исчезающе мала (0,003 мг/дм³), в семь раз ниже минимальных мониторинговых значений (0,02 мг/дм³) и в 43 раза ниже характерных значений (0,13 мг/дм³).

Концентрация нитритов в оз. Сергелях (0,046 мг/дм³) сопоставима с мониторинговыми значениями (< 0,05 мг/дм³) и в 1,5 раза выше характерных значений (0,03 мг/дм³).

Концентрация нитратов в оз. Сайсары (0,41 мг/дм³) была в 5,4 раза ниже максимальных мониторинговых значений (2,2 мг/дм³) и в 2,8 раза ниже характерных значений (1,16 мг/дм³).

Концентрация нитратов в оз. Сергелях (1,22 мг/дм³) была почти на порядок выше характерных значений (0,13 мг/дм³). При мониторинговых исследованиях в период открытой воды в 2009-2014 гг. нитраты в оз. Сергелях не обнаруживались, пределы обнаружения авторы (Руфова и Ксенофонтова, 2015; Руфова и Татаринова, 2015) не указывают.

В целом суммарная концентрация азота в виде различных его форм (NH₄⁺, NO₂⁻; NO₃⁻) в оз. Сайсары была в 2,3 раза выше, чем в оз. Сергелях. Из рисунка видно, что оз. Сайсары находится в районе густой городской застройки, а оз. Сергелях в районе садоводческих хозяйств. Суммарная концентрация азота в виде различных его форм в оз. Сайсары превышала характерные значения в 2,3 раза, а в оз. Сергелях в 2,6 раз что, вероятно, связано с особенностями подледного периода.

По концентрации фосфатов (1,04 мг/дм³) в период исследования оз. Сайсары попадает в категорию гипертрофных водоемов (Таблица 1). Концентрация фосфатов в это время превышала характерные значения (0,44 мг/дм³) в 2,4 раза и максимальные мониторинговые значения (0,76 мг/дм³) в 1,4 раза. В оз. Сергелях концентрация фосфатов (0,162 мг/дм³) была в 6,4 раз меньше, чем в оз. Сайсары, в два раза ниже характерных значений (0,33 мг/дм³) и на порядок ниже максимальных мониторинговых значений (2,4 мг/дм³). По концентрации фосфатов на момент исследования оз. Сергелях попадает в категорию мезотрофных водоемов (0,15-0,45 мг/дм³).

Концентрация общего фосфора (P_{общ}) в оз. Сайсары составляла 0,53 мг/дм³, а органического фосфора (P_{орг}) – 0,19 мг/дм³. Доля P_{орг} в воде оз. Сайсары составляла 36%. Концентрация P_{общ} в оз. Сергелях составляла 0,23 мг/дм³, что в 2,3 раза ниже, чем в оз. Сайсары. Концентрация P_{орг} в оз. Сергелях была почти такая же, как в оз. Сайсары и составляла ~ 0,18 мг/дм³. Таким образом, доля P_{орг} в воде оз. Сергелях составляла 77%, что в два раза выше, чем в оз. Сайсары. Это указывает на более эффективную утилизацию фосфора биотой оз. Сергелях.

Различие озер по биогенным нагрузкам, вероятно, обусловлено неравномерным распределением антропогенных факторов.

Концентрация Si в оз. Сайсары (1760 мкг/дм³) и оз. Сергелях (1590 мкг/дм³) была сопоставима. В исследуемый период вода обоих озер по данному показателю пригодна для хозяйственно питьевого и культурно-бытового использования, поскольку примерно в шесть раз ниже ПДК_{х/п_к/б} (10000 мкг/дм³). Рыбохозяйственный норматив по Si не установлен. Характерных и мониторинговых значений по Si в исследуемых озерах найти не удалось.

3.3. Органическое вещество

Содержание органических веществ оценивалось по показателям ХПК (общее количество растворенных органических веществ) и ПМО (содержание легкоокисляемых органических веществ). ХПК в оз. Сайсары составляло 122 мг O₂/дм³, что сопоставимо с ХПК в оз. Сергелях (133 мг O₂/дм³). Показатели ПМО в этих озерах также близки – 38,8 и 42,4 O₂/дм³ соответственно.

Показатели ХПК в обоих озерах превышали ПДК технической воды (60 мг O₂/дм³) в ~ 2 раза. Показатели ХПК в обоих озерах превышали ПДК водоемщиков, используемых для рекреационного водопользования, а также ПДК водоемов в черте населенных мест, ПДК воды в открытых системах технического водоснабжения, ПДК воды для полива улиц и зеленых насаждений (30 мг O₂/дм³) – в ~ 4 раза. Показатели ХПК в обоих озерах превышали ПДК поверхностных водоемщиков, используемых для централизованного водоснабжения населения, ПДК воды для хозяйственно-бытового водопользования, в местах водозабора для плавательных бассейнов, водолечебниц (15 мг O₂/дм³) – в 8-9 раз (Таблица 1). То есть для всех этих целей воду из оз. Сайсары и оз. Сергелях в исследуемый период использовать нельзя.

Показатели ПМО нормируются для питьевой воды централизованного (не более 5 мг O₂/дм³) и нецентрализованного (не более 7 мг O₂/дм³) водоснабжения, а также для воды аквапарков (не более 7,5 мг O₂/дм³). Исследуемые озера по этим показателям превышали установленные нормативы минимум в 5 раз. То есть вода этих озер в исследуемый период также непригодна для питья и организации аквапарков.

Сравнивая полученные результаты с мониторинговыми наблюдениями, видно, что ХПК в оз. Сайсары приближается к максимальным значениям (150 мг O₂/дм³), зафиксированным в период открытой воды в 2009-2021 гг. Характерные значения ХПК для оз. Сайсары в работе (Легостаева и Руфова, 2022) не указаны. Данных в научной литературе по ХПК и ПМО для оз. Сергелях также обнаружить не удалось.

По соотношению ПМО/ХПК можно оценить качественный состав органического вещества природных вод (Скопинцев, 1950; Скопинцев и Гончарова, 1987). Условной границей органического вещества аллохтонного и автохтонного происхождения принято значение ПМО/ХПК = 40%. В оз. Сайсары этот показатель составляет 31%, а в оз.

Сергелях – 32%. То есть, в обоих озерах основная часть органического вещества – автохтонная.

3.4. Микроэлементы

К микроэлементам (в иностранной литературе trace elements – следовые элементы) относят химические элементы, содержание которых в природных водах < 1 мг/дм³ (Gaillardet et al., 2003).

Концентрация Fe, которое также относят и к биогенным элементам, в оз. Сайсары (200 мкг/дм³) и оз. Сергелях (250 мкг/дм³) превышала рыбохозяйственные нормативы в 2 и 2,5 раза соответственно (Таблица 1). В оз. Сергелях концентрация Fe была близка к характерным значениям (270 мкг/дм³) и в 3,4 раза ниже максимальных мониторинговых значений (850 мкг/дм³), а в оз. Сайсары концентрация Fe была почти в 2 раза ниже характерных значений (390 мкг/дм³) и в 2,7 раз ниже максимальных мониторинговых значений (530 мкг/дм³). По данному показателю вода обоих озер пригодна для хозяйственно питьевого и культурно-бытового использования (ПДК_{х/п_к/б} = 300 мкг/дм³).

Концентрация Mn в оз. Сайсары (1050 мкг/дм³) была в три раза выше, чем в оз. Сергелях (350 мкг/дм³). Оба показателя существенно превышали рыбохозяйственные нормативы (ПДК_{р/х} = 10 мкг/дм³) – в 105 и 35 раз соответственно, а также нормативы воды для хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК_{х/п_к/б} = 100 мкг/дм³) – в 10,5 и 3,5 раз соответственно. Концентрация Mn в обоих озерах также существенно превышала характерные значения (20 мкг/дм³) – в ~50 и 17,5 раз, соответственно. В работе (Кайдалова и Олесова, 2019) отмечается, что высокий и экстремально высокий уровни загрязнения оз. Сайсары марганцем относительно рыбохозяйственных нормативов фиксировались в зимнюю-летнюю межень в 2012 и 2013 гг. То есть, в это время концентрация Mn могла быть больше 500 мкг/дм³, однако насколько больше авторы не указывают. Концентрация Mn в оз. Сергелях на порядок превышала максимальные мониторинговые значения (29 мкг/дм³).

Высокие уровни содержания Mn в воде озер в подледный период в большей степени обусловлены особенностями его геохимического поведения. На концентрацию Mn в природных водах оказывает влияние содержание растворенного кислорода и величина окислительно-восстановительного потенциала. В умеренных окислительных условиях растворимый Mn²⁺ переходит в нерастворимый Mn⁴⁺, который мигрирует, главным образом, в виде коллоидных форм (~90%, Pokrovsky et al., 2006), он может утилизироваться в донные отложения и/или сорбироваться взвешенным веществом (Чебыкин и др., 2012). В период ледостава, при недостатке кислорода, происходят обратные процессы мобилизации Mn из донных отложений – в сезонном цикле его концентрация в воде может меняться в десятки и сотни раз (Чебыкин и др., 2012). Mn может также поступать в водоемы при подпитке подземными

водами, которые, как правило, содержат значительно больше Mn, по сравнению с поверхностными водами (Сутурин и др., 2016). Процессам мобилизации Mn в воду также способствует болотистый ландшафт (кислая среда) и понижение скорости течения. На фоне таких существенных природных процессов вычлнить антропогенный вклад является сложной задачей. В подледный период по данному показателю вода обоих озер не пригодна для питья без предварительной очистки.

Концентрация Zn в оз. Сайсары (0,83 мкг/дм³) и оз. Сергелях (5,1 мкг/дм³) была ниже ПДК_{р/х} (10 мкг/дм³) и существенно ниже ПДК_{х/п_к/б} (1000 мкг/дм³), а также характерных значений, которые составляют 120 и 20 мкг/дм³ для оз. Сайсары и оз. Сергелях соответственно (Таблица 1). Максимальные мониторинговые значения Zn составляют 390 и 490 мкг/дм³ для оз. Сайсары и оз. Сергелях соответственно. Столь высокие значения не характерны для природных водоемов, что вызывает большие сомнения в качестве аналитических данных.

Концентрация Cu в оз. Сайсары была <0,4 мкг/дм³, что ниже ПДК_{р/х} (1 мкг/дм³) и существенно ниже ПДК_{х/п_к/б} (1000 мкг/дм³). В оз. Сергелях концентрация Cu (1,77 мкг/дм³) превышала рыбохозяйственные нормативы в ~ 1,8 раз. Характерная концентрация Cu в обоих озерах составляет 1 мкг/дм³ с вариациями мониторинговых значений <1-11,7 мкг/дм³ в оз. Сайсары и 1,5-2,3 мкг/дм³ в оз. Сергелях (Таблица 1). В исследуемый период вода обоих озер по данному показателю пригодна для хозяйственно-питьевого и культурно-бытового использования.

Концентрация Pb в оз. Сайсары (0,025 мкг/дм³) и оз. Сергелях (0,025 мкг/дм³) была существенно ниже ПДК_{р/х} (6 мкг/дм³), ПДК_{х/п_к/б} (10 мкг/дм³) и характерных значений (4 и 10 мкг/дм³ для оз. Сайсары и оз. Сергелях, соответственно). Вариации мониторинговых значения Pb составляют 1,4-22,2 и 4,9-6,8 мкг/дм³ для оз. Сайсары и оз. Сергелях соответственно. Столь большая разница наших данных с опубликованными, скорее всего, обусловлена аналитическим фактором. В данной работе использован высокочувствительный метод многоэлементного ИСП-МС анализа, который имеет пределы обнаружения элементов на порядки ниже, по сравнению с традиционно используемыми методами (атомная абсорбция и т.п.). Скорее всего, авторы, проводившие мониторинговые исследования, использовали методы (к сожалению, не указывают), пределы обнаружения которых оставляли желать лучшего. Это различие просматривается практически для всех элементов с характерной концентрацией на уровне единиц-десятков мкг/дм³ и ниже (Zn, Co, Cr, Mo, Li, Таблица 1).

Среди других микроэлементов, превышавших установленные нормативы, обнаружены Sr (1,8 ПДК_{р/х}), V (1,7 ПДК_{р/х}) и Br (1,6 ПДК_{х/п_к/б}) в оз. Сайсары. Концентрация Sr (720 мкг/дм³) в оз. Сайсары превышала характерные значения (260 мкг/дм³) в 2,8 раза. В оз. Сергелях концентрация

Sr (170 мкг/дм³) была в 2,4 раза ниже ПДК_{р/х} (400 мкг/дм³) и немного выше характерных значений (150 мкг/дм³). По V, Br и большинству других микроэлементов, измеренных нами, характерных и других значений в литературе найти не удалось.

3.5. Геохимический состав

Геохимический состав воды водных объектов, с одной стороны, весьма специфичен, с другой – изменчив, он формируется под влиянием множества природно-климатических, физических, физико-химических, биологических и антропогенных факторов, которые влияют на процессы взаимодействия воды с горными породами, почвам, биотой и атмосферой (Перельман, 1982). Из полученных данных (Таблица 1) следует, что примерно в половине случаев концентрация химических элементов в оз. Сайсары была выше, чем в оз. Сергелях (в размах): Co (1,3), Y (1,4), Ta (1,4), Rb (1,5), Ti (1,5), Cr (1,6), Sc (1,7), Zr (1,9), V (2), Hf (2), Be (2,2), As (2,3), Ni (2,3), P (2,3), Ba (2,8), Nb (2,8), Ca (2,9), K (3), Mn (3), I (3,4), Mg (3,6), Li (3,7), Br (4), Sr (4,2), Na (4,7), Se (6,6), Cl (6,7), Ge (7,9) и B (8,5). В десяти случаях, наоборот, была меньше (в размах): Fe (1,3), Ga (1,9), Th (3), Al (3,7), W (4,1), Cu (4,4), Pb (4,6), Zn (6,1), Cd (6,3) и Mo (9,1). По остальным элементам (Hg, Si, Ag, Sn, Sb, Te, Cs, REE, Ta, Re, Tl, Bi и U) различий, в рамках ошибок определения их концентраций, между озерами не обнаруживалось.

3.6. Комплексная оценка качества вод по гидрохимическим и геохимическим показателям

Полученные данные не позволяют использовать формальные комплексные показатели – удельный комбинаторный индекс загрязненности вод (УКИВЗ) и индекс загрязненности вод (ИЗВ).

Для оценки первого индекса требуется определение 15 обязательных показателей (O₂-раств, БПК₅, ХПК, фенолы, нефтепродукты, NH₄⁺, NO₂⁻, NO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, Fe, Mn, Cu, Zn, Ni) (ПД 52.24.643-2002), среди которых O₂-раств, БПК₅, фенолы, нефтепродукты мы не определяли. При расчете УКИВЗ, наряду с кратностью превышения ПДК, используются показатели комплексности и повторяемости загрязнения за исследуемый период. В данной работе проведено единичное опробование, что не позволяет определить показатель повторяемости. В зависимости от величины УКИВЗ определяется класс качества вод от I (условно чистая) до V (экстремально грязная).

Для оценки второго показателя требуется определение шести наиболее важных показателей для данного водоема, среди которых обязательными являются O₂-раств и БПК₅ (Временные..., 1986). В зависимости от величины ИЗВ определяется класс качества вод от I (очень чистая) до VII (чрезвычайно грязная). В данной работе два последних показателя не определялись. Для сравнения степени загрязненности оз. Сайсары и оз. Сергелях рассчитывался ИЗВ с имеющимся набором загрязнителей,

где вместо БПК5 использован близкий критерий – перманганатная окисляемость (ПМО). При этом набор загрязнителей не ограничивался шестью наиболее важными показателями, а были использованы все n показателей C_i , которые достигли или превысили установленные нормативы (ПДК_{p/x} и ПДК_{x/p_к/б}) хотя бы в одном из озер:

$$\text{ИЗВ}(y) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \right) / n \quad (1),$$

где ИЗВ(y) – условный индекс загрязненности исследуемых озер.

Согласно полученным данным, имеется семь таких показателей по рыбохозяйственным нормативам (Mg^{2+} , NH_4^+ , PO_4^{3-} , Fe, Mn, Cu, и V) и девять показателей по нормативам для водных объектов хозяйственно питьевого и культурно-бытового назначения (Mg^{2+} , жесткость воды, минерализация воды, NH_4^+ , PO_4^{3-} , ХПК, ПМО, Mn и Br) (Таблица 2).

В Таблице 2 приведены степени превышения ПДК по выбранным показателям и рассчитанные уровни загрязненности (УЗ) (РД 52.24.643-2002) и условные индексы загрязнения вод ИЗВ(y).

В оз. Сайсары ИЗВ(y)_{p/x} составлял 16,7, что в 2,8 раз выше, чем в оз. Сергелях (ИЗВ(y)_{p/x} = 6). То есть по рыбохозяйственным нормативам оз. Сайсары было почти в три раза хуже, чем оз. Сергелях. Подавляющий вклад в ИЗВ(y)_{p/x} в обоих случаях вносил Mn, который превышал установленный норматив в 105 раз в оз. Сайсары и в 35 в оз. Сергелях, что соответствует экстремально высокому и высокому уровням загрязненности, соответственно. Средние уровни загрязненности вод для рыбохозяйственных целей обнаруживались по аммонии (4,5 ПДК_{p/x}) в оз. Сайсары и по Fe (2,5 ПДК_{p/x}) в оз. Сергелях. Уровень загрязненности по остальным компонентам был низким или отсутствовал (Таблица 2).

ИЗВ(y)_{x/p_к/б} в оз. Сайсары составлял 3,42, что в 1,5 раз выше, чем в оз. Сергелях (ИЗВ(y)_{x/p_к/б} = 2,25). То есть по хозяйственно питьевым и культурно-бытовым нормативам оз. Сайсары было также хуже, чем оз. Сергелях. Основной вклад в обоих случаях в этот индекс вносили ХПК, ПМО и Mn, которые превышали установленные нормативы в ~8/~9, ~5/~6 и 10,5/3,5 раз для оз. Сайсары/оз. Сергелях, соответственно. Вода обоих озер по содержанию органических веществ соответствовала условно высокому уровню загрязненности, который, в отсутствие указаний в нормативных документах рассчитан аналогично кратности превышений ПДК по показателю БПК5 (РД 52.24.643-2002) (см. примечания к Таблице 2). По концентрации Mn вода оз. Сайсары соответствовала высокому уровню загрязненности, а вода оз. Сергелях – среднему уровню загрязненности. Уровень загрязненности по остальным компонентам был низким или отсутствовал (Таблица 2). Таким образом, для хозяйственно питьевых и культурно-бытовых целей использование воды озер являлось наиболее опасным по содержанию органических веществ, наряду с Mn.

3.7. Микробиологические характеристики

ОЧМ в оз. Сайсары была $14,6 \times 10^6$ кл./см³, а в оз. Сергелях $6,4 \times 10^6$ кл./см³. Согласно ГОСТ 17.1.3.07-82 ОЧМ является показателем санитарного состояния водоема и учитывается при оценке его трофического статуса. Вода подразделяется на шесть классов качества: ОЧМ менее $0,5 \times 10^6$ кл./см³ – I (очень чистая), ОЧМ = $0,5-1,0 \times 10^6$ кл./см³ – II (чистая), ОЧМ = $1,1-3,0 \times 10^6$ кл./см³ – III (умеренно загрязненная), ОЧМ = $3,1-5,0 \times 10^6$ кл./см³ – IV (загрязненная), ОЧМ = $5,1-10,0 \times 10^6$ кл./см³ – V (грязная), ОЧМ более $10,0 \times 10^6$ кл./см³ – VI (очень грязная (ГОСТ 17.1.3.07-82)). Таким образом, степень загрязненности воды по показателю ОЧМ в озерах Сергелях и Сайсары соответствует V и VI классам качества.

Наибольшая численность аллохтонной микрофлоры, привнесенной в водоем, и оцениваемой по показателю ОМЧ37, была в оз. Сергелях – 447 КОЕ / см³. В оз. Сайсары ОМЧ37 была на порядок ниже (33 КОЕ / см³). Численность автохтонной микрофлоры в оз. Сергелях (ОМЧ22 = 14 080 КОЕ / см³) также была значительно выше, чем в оз. Сайсары (ОМЧ22 = 323 КОЕ / см³). По соотношению ОМЧ22 / ОМЧ37 (коэффициент самоочищения, КСО) можно оценить активность и состояние процессов самоочищения природных водоемов (МУК 4.2.1884-04). По данному параметру вода обоих озер соответствует завершённому процессу самоочищения (КСО ≥ 4). Несмотря на большую численность органотрофных микроорганизмов в оз. Сергелях, процессы самоочищения в нем протекали более интенсивно (КСО = 31,5) по сравнению с оз. Сайсары (КСО = 9,8).

Тем не менее, наличие санитарно показательных бактерий свидетельствовало о неблагоприятной санитарно-микробиологической обстановке, особенно в оз. Сергелях.

В оз. Сайсары были обнаружены энтерококки в количестве 36 КОЕ / 100 см³, что ниже нормативов поверхностных вод, используемых для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, а также для водоснабжения пищевых предприятий (100 КОЕ / 100 см³), однако в 3,6 раз выше нормативов для поверхностных вод в зонах рекреации, а также вод в черте населенных мест (для купания и занятия водным спортом) – 10 КОЕ / 100 см³ (СанПиН 1.2.3685-21). В оз. Сергелях содержание энтерококков было почти на порядок больше, чем в оз. Сайсары, и составляло 346 КОЕ / 100 см³, что значительно выше всех принятых в Российской Федерации нормативов для поверхностных вод.

В воде оз. Сайсары было обнаружено небольшое количество кишечной палочки *E. coli* (4 КОЕ / 100 см³), которое не превышало нормативы поверхностных вод для всех видов водопользования (100 КОЕ / 100 см³) и природной воды для технического водоснабжения (10 КОЕ / 100 см³). В оз. Сергелях содержание *E. coli* было в 60 раз больше, чем в оз. Сайсары, и составляло 240 КОЕ / 100 см³, что в 2,4 раза выше общепринятых нормативов для поверх-

Таблица 2. Уровни загрязненности (УЗ) и условные индексы загрязнения вод ИЗВ(у) оз. Сайсары и оз. Сергелях по показателям, достигающим и превышающим ПДК_{р/х} и ПДК_{х/п_к/б} хотя бы в одном из озер

Класс опасности *	Показатель	оз. Сайсары				оз. Сергелях			
		Ci / ПДК _{р/х}	УЗ _{р/х}	Ci / ПДК _{х/п_к/б}	УЗ _{х/п_к/б}	Ci / ПДК _{р/х}	УЗ _{р/х}	Ci / ПДК _{х/п_к/б}	УЗ _{х/п_к/б}
3	Mg ²⁺	1,25	Н	1,00	Н	0,35	но	0,28	Н
ну	Ж	ну	–	1,19	Н	ну	–	0,37	Н
ну	Мин	ну	–	1,03	Н	ну	–	0,28	Н
4	NH ₄ ⁺	4,54	С	1,51	Н	1,32	Н	0,44	Н
3	PO ₄ ³⁻	1,74 (1)	Н	0,30	Н	0,27 (1)	но	0,05	Н
ну	ХПК	ну	–	8,13 ⁽²⁾	В ⁽⁴⁾	ну	–	8,85 ⁽²⁾	В ⁽⁴⁾
ну	ПМО	ну	–	5,54 ⁽³⁾	В ⁽⁴⁾	ну	–	6,06 ⁽³⁾	В ⁽⁴⁾
3-4*	Fe	2,00	Н	<	Н	2,50	С	<	Н
3	Mn	105	ЭВ	10,5	В	35	В	3,5	С
3-4*	Cu	0,40	но	<	но	1,77	Н	<	но
3	V	1,66	Н	<	но	0,85	но	<	но
2	Br	<	но	1,55	Н	<	но	0,39	но
	ИЗВ(у)	ИЗВ(у) _{р/х}		ИЗВ(у) _{х/п_к/б}		ИЗВ(у) _{р/х}		ИЗВ(у) _{х/п_к/б}	
		16,7		3,42		6,01		2,25	

Примечания: ну – нормативы не установлены; < – показатель не взят в расчет, поскольку ниже нормативов для обоих озер.

(1) для расчета использован норматив для эвтрофных озер PO₄³⁻ = 0,6 мг/дм³.

(2) для расчета использован норматив ХПК = 15 мг O₂ / дм³ для воды поверхностных водоисточников, используемых для централизованного водоснабжения населения, для хозяйственно-бытового водопользования, мест водозабора для плавательных бассейнов, водолечебниц.

(3) для расчета использован норматив ПМО = 7 мг O₂ / дм³ для питьевой воды нецентрализованного водоснабжения.

УЗ – уровень загрязненности воды по кратности превышения ПДК (РД 52.24.643-2002): Н – низкий (1-2) ПДК, С – средний [2-10] ПДК; В – высокий [3-5] ПДК для веществ 1-2 классов опасности, [10-50] ПДК для веществ 3-4 классов опасности, ЭВ – экстремально высокий ≥ 5 ПДК для веществ 1-2 классов опасности, ≥ 50 ПДК для веществ 3-4 классов опасности, прочерк «-» невозможно рассчитать УЗ по причине отсутствия норматива; но – уровень загрязненности не определен т.к. ниже ПДК.

(4) – критерии определения высокого и экстремально высокого уровней загрязненности воды по показателям ХПК и ПМО определен по аналогии с кратностью превышения ПДК БПК₅: 5-20 ПДК – высокий, > 20 ПДК – экстремально высокий.

* - класс опасности химических веществ согласно (СанПиН 1.2.3685-21) в воде питьевой систем централизованного, в том числе горячего, и нецентрализованного водоснабжения, воде подземных и поверхностных водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования, воде плавательных бассейнов, аквапарков. Для комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям класс опасности для Fe и Cu понижен до 4 (РД 52.24.643-2002).

ностных вод и в 24 раза выше норматива для природных вод, которые можно использовать для технического водоснабжения.

Таким образом, за исключением ОЧМ, по всем измеренным микробиологическим характеристикам оз. Сергелях было на 1-2 порядка хуже, чем оз. Сайсары, что, вероятно, связано с отсутствием септиков в многочисленных садово-огороднических хозяйствах, которые вплотную примыкают к берегам озера (Рис.). В исследуемый период воду оз. Сергелях нельзя было использовать для питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, а также для водоснабжения пищевых предприятий, технических и рекреационных целей. Вода оз. Сайсары по исследованным микробиологическим характеристикам могла быть использована для указанных целей за исключением рекреационных.

4. Заключение

Вода крупных озер г. Якутска (оз. Сайсары и оз. Сергелях) в конце подледного периода 2021 г. по многим гидрохимическим, геохимическим и микробиологическим характеристикам не соответствовала нормативам качества, установленным для водных объектов рыбохозяйственного, хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения.

Комплексная оценка качества вод по гидрохимическим и геохимическим показателям, полученная с помощью условного индекса загрязненности вод ИЗВ(у), показывает, что вода оз. Сайсары была в три раза хуже, чем вода оз. Сергелях по рыбохозяйственным нормативам и в 1,5 раза хуже по нормативам для водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения.

Наибольший уровень загрязнения обоих озер фиксируется по Mn (10,5-105 ПДК) и органическому веществу (до 9 ПДК), большая часть которого, однако, имеет автохтонное происхождение. Высокие концентрации Mn, скорее всего, обусловлены сезонными причинами.

По биогенным компонентам (азот, фосфор) оз. Сайсары попадала в категорию грязных и эвтрофных водоёмов, а оз. Сергелях в категорию загрязнённых и мезотрофных.

Общее бактериальное загрязнение оз. Сайсары также было выше (VI класс качества, категория очень грязных вод), чем оз. Сергелях (V класс качества, категория грязных вод), однако содержание санитарно-показательных (*E. coli* и рода *Enterococcus*) и органотрофных (ОМЧ22, ОМЧ37) бактерий в оз. Сергелях было на порядок и более выше, чем в оз. Сайсары, и превышало все российские нормативы, установленные для поверхностных вод.

Полученные результаты указывают на необходимость принятия мер по улучшению качества вод оз. Сайсары и оз. Сергелях, поскольку они находятся в черте г. Якутска и имеют большое культурно-бытовое и рекреационное значение. Озеро Сайсары входит в список уникальных озёр Якутии и имеет сакральную ценность.

Благодарности

Это исследование было проведено с использованием оборудования Центра электронной микроскопии и ИСП-МС анализа Центра коллективного пользования «Ультрамикроанализ» при Лимнологическом институте Сибирского отделения Российской академии наук. Авторы благодарны за помощь в отборе проб Копырину И.И. Работа выполнена в рамках государственных заданий № 121032300186-9 (Лимнологический институт Сибирского отделения Российской академии наук) и № 121012190038-0 (Институт биологических проблем криолитозоны Сибирского отделения Российской академии наук).

Конфликт интересов

Авторы настоящим заявляют, что данная исследовательская работа и выпуск рукописи соответствуют этическим стандартам и ни у кого из авторов нет потенциального конфликта интересов.

Список литературы

Алекин О.А. 1953. Основы гидрохимии. Л.: Гидрометеоздат, 295 с.

Барам Г.И., Верещагин А.Л., Голобокова Л.П. 1999. Применение микроколонной высокоэффективной жидкостной хроматографии с УФ-детектированием для определения анионов в объектах окружающей среды. Аналитическая химия 54(9): 962 – 965.

Васильева И.И. 1968. Состав и сезонная динамика фитопланктона озера окрестностей г. Якутска. Автореф. дисс... канд. биол. наук. Новосибирск, Россия.

Временные методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод. 1986. ГК СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды. URL: <https://standartgost.ru/g/pkey-14293742635>

Габышев В.А., Габышева О.И. 2020. К изучению влияния тяжелых металлов на развитие фитопланктона озер г. Якутска и окрестностей. Природные ресурсы Арктики и Субарктики 25(4): 81 – 91. DOI: [10.31242/2618-9712-2020-25-4-6](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2020-25-4-6)

Горбенко Ю.А. 1961. О наиболее благоприятном количестве сухого питательного агара в средах для культивирования морских микроорганизмов. Микробиология 30(1): 168 – 172.

Горохов М. 2023. Население Якутска за пять лет увеличилось на 60 тысяч человек. Комсомольская правда. Якутия, 08 апреля 2023 г. URL: <https://www.yakutia.kp.ru/online/news/5217118/?ysclid=lu7yjk3zd550642327>

ГОСТ 17.1.3.07-82. 1982. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества воды водоемов и водотоков. Межгосударственный стандарт. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/29997/?ysclid=lw7i759h1o63072849>

ГОСТ 31942-2012. 2012. Вода. Отбор проб для микробиологического анализа. Межгосударственный стандарт. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/53467/?ysclid=lw92j8ce1m446660343>

ГОСТ 24849-2014. 2014. Методы санитарно-биологического анализа для полевых условий. Межгосударственный стандарт. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58822/?ysclid=lwho13pwb444456396>

Григорьева М.В., Соловьева М.И. 2020. Качество озер г. Якутска по состоянию бентосных сообществ. Проблемы региональной экологии 5: 12 – 16. DOI: [10.24412/1728-323X-2020-5-12-16](https://doi.org/10.24412/1728-323X-2020-5-12-16)

Кайдалова М.В., Олесова А.И. 2019. Озеро «Сайсары» г. Якутск. В: Материалы XI Международной студенческой научной конференции «Студенческий научный форум 2019». Москва. Научный парк МГУ. URL: <https://files.scienceforum.ru/pdf/2019/5c6bb00cee22f.pdf>

Копырина Л.И. 2013. Эпифитные водоросли – индикаторы сапробности некоторых озер окрестностей г. Якутска. Наука и образование 4: 77 – 81.

Ксенофонтова М.И., Легостаева Я.Б., Ябловская П.Е. и др. 2013. Характеристика химического состава вод и донных отложений крупных водоемов г. Якутска. Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук 4: 493 – 500.

Купание запретили в озерах Хатынг-Юрях и Сергелях в Якутске. 2021. Известия, 16 июля 2021 г. URL: <https://iz.ru/1194109/2021-07-16/kupanie-zapretili-v-ozerakh-khatyng-iuriakh-i-sergeliakh-v-iakutske>

Легостаева Я.Б., Руфова А.А. 2022. Анализ гидрохимического режима наиболее крупных озер города Якутска. Природные ресурсы Арктики и Субарктики 27(4): 572 – 591. DOI: [10.31242/2618-9712-2022-27-4-572-591](https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-4-572-591)

Макаров В.Н., Чижук А.Л. 2009. Поступление фосфатов в озера Якутска. Наука и образование 4: 67 – 69.

МУК 4.2.1884-04. 2004. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ вод поверхностных водных объектов. Методические указания. URL: <https://internet-law.ru/stroyka/text/45900/>

Николаев А.А., Архипов И.В. 2021. Экологическое состояние озер города Якутска для туристско-рекреационного использования. Успехи современного естествознания 11: 106 – 113.

Оценка численности населения на 1 января 2023 года по муниципальным районам Территориальный орган ам. Федеральной службы государственной статистики по Республике Саха (Якутия). СахаСтат (4 апреля 2023). 2023. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AF%D0%BA%D1%83%D1%82%D1%81%D0%BA#cite_note-87

Перельман А.И. 1982. Геохимия природных вод. М.: Наука, 154 с.

Попова Н.В., Федулова С.И. 2022. Исследование воды озера Сайсары по гидрохимическим показателям. В: Чугуновские агроочтения. Сборник научных статей по материалам XIV Всероссийской научно-практической конференции агротехнологической направленности, посвященной 100-летию образования Якутской Автономной Советской Социалистической Республики и Году культурного наследия народов в России, 140 – 144.

Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552 (ред. от 12.10.2018). 2016. Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120>

РД 52.24.643-2002. 2002. Метод комплексной оценки степени загрязненности поверхностных вод по гидрохимическим показателям. Руководящий документ. Ростов на Дону: Росгидромет, 55 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/10d/4293831806.pdf>

Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Часть I. 2009. Ростов-на-Дону: Наука-Образование-Культура, 1044 с.

Руфова А.А., Ксенофонтова М.И., Ябловская П.Е. 2012. Мониторинг состояния озер г. Якутска по гидрохимическим показателям. Наука и образование 4: 52 – 55.

Руфова А.А., Ксенофонтова М.И., Трофимова Л.Н. 2013. Содержание некоторых микроэлементов в воде оз. Сайсары. Наука и образование 3: 139 – 141.

Руфова А.А., Татаринова А.В. 2015. Антропогенное влияние на гидрохимическое и гидробиологическое состояние поверхностных вод северных городов (на примере г. Якутска). Современные проблемы науки и образования 4. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20468>

Руфова А.А., Ксенофонтова М.И. 2015. Гидрохимический состав как один из индикаторов современных условий формирования озер (на примере г. Якутска). Наука и образование 2: 144 – 150.

Руфова А.А. 2023. Интегральные показатели гидрохимического состояния озерных вод г. Якутск. В: Актуальные проблемы экологии и природопользования. Сборник научных трудов XXIV Международной научно-практической конференции. В 2-х томах. Москва, стр. 323 – 328.

СанПиН 1.2.3685-21. 2021. Гигиенические нормы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 28 января 2021 г. N 2. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=656010>

Скопинцев Б.А. 1950. Органическое вещество в природных водах (водный гумус). В: Труды Океанографического института. Л.: Гидрометеиздат 17(29), 290 с.

Скопинцев Б.А., Гончарова И.А. 1987. Использование значений отношений различных показателей органического вещества природных вод для его качественной оценки. В: Современные проблемы региональной гидрохимии. Л.: Гидрометеиздат, стр. 95 – 117.

Сутурин А.Н., Чебыкин Е.П., Мальник В.В. и др. 2016. Роль антропогенных факторов в развитии экологического стресса в литорали оз. Байкал (акватория пос. Листвянка). География и природные ресурсы 6: 43 – 54. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(43-54\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(43-54))

Татаринова А.В., Салова Т.А. 2013. Гидробиологическая характеристика городских и пригородных озер г. Якутска. Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований 8-1: 81 – 82. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=3854>

Фомин Г.С. 2000. Вода. Контроль химический, бактериальный и радиационной безопасности по международным стандартам. М.: Протектор, 840 с.

Хараев Г.И., Ямпиллов С.С., Танганов Б.Б. и др. 2004. Экологический мониторинг. Улан-Удэ: ВСГТУ, 77 с.

Чебыкин Е.П., Сороковикова Л.М., Томберг И.В. и др. 2012. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам. Химия в интересах устойчивого развития 20(5): 613 – 631.

Чебыкин Е.П., Дамбинов Ю.А., Сутурин А.Н. 2020. Многоэлементный анализ надшламовых вод карт-копителей Байкальского целлюлозно-бумажного комбината для выбора стратегии ремедиации территории. Вода и экология: проблемы и решения 84(4): 67 – 80. DOI: [10.23968/2305-3488.2020.25.4.67-80](https://doi.org/10.23968/2305-3488.2020.25.4.67-80)

Чердонова О.В., Попова Н.В. 2022. Экологическое состояние озера Сайсары и значение планктона для экосистемы озера. В: Стратегия и перспективы развития агротехнологий и лесного комплекса Якутии до 2050 года. Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 100-летию образования Якутской АССР и 85-летию Первого президента РС(Я) М. Е. Николаева (Николаевские чтения). М.: Знание-М, с. 615 – 619. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?edn=hgipve>

Aries S., Valladon M., Polve M. et al. 2000. A routine method for oxide and hydroxide interference corrections in ICP-MS chemical analysis of environmental and geological samples. Geostandards newsletter 24(1): 19 – 31. DOI: [10.1111/j.1751-908X.2000.tb00583.x](https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2000.tb00583.x)

Bashenkhaeva M.V., Zakharova Yu.R., Petrova D.P. et al. 2015. Sub-ice microalgal and bacterial communities in freshwater Lake Baikal, Russia. Microbial Ecology 70: 751–765 DOI: [10.1007/s00248-015-0619-2](https://doi.org/10.1007/s00248-015-0619-2)

Gaillardet J., Viers J., Dupre B. 2003. Trace elements in river waters. In: Holland H.M. and Turekian K.K. (Eds.), Treatise on Geochemistry, V. 5. Oxford: Elsevier Pergamon, pp. 225 – 272. DOI: [10.1016/B978-0-08-095975-7.00507-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00507-6)

Murray R.G.E., Doetsch R.N., Robinow C.F. 1994. Determinative and cytological light microscopy. In: Gerhardt P., Murray R.G.E., Wood W.A., Krieg N.R. (Eds.) Methods for general and molecular bacteriology. Washington, DC: American Society for Microbiology, pp. 21 – 41.

Pokrovsky O.S., Schott J., Dupre B. 2006. Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil porewaters of permafrost-dominated basaltic terrain in Central Siberia. Geochimica et Cosmochimica Acta 70: 3239 – 3260. DOI: [10.1016/j.gca.2006.04.008](https://doi.org/10.1016/j.gca.2006.04.008)

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](https://doi.org/10.4319/lo.1980.25.5.0943)

Suturin A.N., Paradina L.F., Epov V.N. et al. 2003. Preparation and assessment of a candidate reference sample of Lake Baikal deep water. Spectrochimica Acta Part B 58: 277 – 88. DOI: [10.1016/S0584-8547\(02\)00157-X](https://doi.org/10.1016/S0584-8547(02)00157-X)

Wetzel R.G., Likens G.E. 2000. Limnological analyses. New York: Springer-Verlag, 391 p.