

Peculiarities of the chemical composition of the snow cover in the northern basin of Lake Baikal

Chebunina N.S.[✉], Lutskin E.S.[✉], Sakirko M.V.[✉], Netsvetaeva O.G.[✉]

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

ABSTRACT. This article presents the 2023 data on the snow cover in the northern basin of Lake Baikal. We estimated the spatial distribution of the main chemical elements in the snow cover. The high relative concentration of nitrates and hydrogen ions was a characteristic of the ionic composition of snowmelt water in comparison with the industrial areas of the Baikal region. We calculated the accumulation of major ions and biogenic elements in the snow cover. A comparative analysis of the obtained experimental data with regional background values and results of the similar previous studies revealed a trend towards a decrease in mineralization and an increase in the acidity of snow melt waters over the past 11 years. Low values of the total amount of ions and pH in the snow cover of some areas of the northern basin of Lake Baikal allowed us to classify them as a background for the entire Baikal region.

Keywords: snow cover, chemical composition, pH, major ions, biogenic elements, northern basin of Lake Baikal

For citation: Chebunina N.S., Lutskin E.S., Sakirko M.V., Netsvetaeva O.G. Peculiarities of the chemical composition of the snow cover in the northern basin of Lake Baikal // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 6. - P. 1525-1545. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1525

1. Introduction

The use of snow cover as a study object for the ecological and geochemical characterization of areas with different anthropogenic pressures has recently become increasingly relevant (Wang et al., 2018; Thapa et al., 2020; Szumińska et al., 2021; Shen et al., 2023). Such a trend is due to the simplicity and accessibility of the snow cover sampling process, its high sorption capacity to accumulate pollutants from the air through dry and wet deposition, and the possibility of assessing air pollution level over several winter months. Melted snow can affect the state of soil, changing its acidity, and contribute to eutrophication of water bodies. The study of the chemical composition of precipitation in the Baikal region is of particular importance because this area allocates the unique Lake Baikal, a source of clean drinking water of global importance.

In the early 1950s, K.K. Votintsev (1954) conducted the first studies on the chemical composition of precipitation in the Baikal region. Since 1962, the Irkutsk Hydrometeorological Service has carried out monitoring at five stations. Between the 1970 and 1980s, studies focused on changes in the chemical composition of precipitation caused by an increase in overall air pollution from various industrial facili-

ties (Votintsev and Khodzher, 1981; Khodzher, 1983; Valikova et al., 1985). Since the early 1990s, much attention has been paid to the precipitation acidity due to the launch of new enterprises in the region (Obolkin and Khodzher, 1990; Ermakova, 1998; Urbanavichene et al., 1998).

In recent decades, snow in the Southern Baikal region has been extensively studied. The isotopic and elemental composition of the snow was determined in the Irkutsk city, the Listvyanka settlement, and on the shore of Lake Baikal (Chizhova et al., 2015; Chebykin et al., 2018; Onishchuk et al., 2023). The pollution level of snow at Lake Baikal with petroleum products (Belozertseva et al., 2018; Yanchuk, 2018), polycyclic aromatic hydrocarbons (Marinaite, 2005; Afonina, 2024), and polychlorinated biphenyls (Mamontov et al., 2006; Nikonova and Gorshkov, 2007) was assessed. The macrocomponent composition of snowmelt water was determined in the southern basin of Lake Baikal (Sorokovikova et al., 2004; Tomberg et al., 2016; Vorobjeva et al., 2016; Paradina et al., 2016) and on the southwest coast of the lake (Yanchuk, 2020). The influence of large industrial centers in the south of the Irkutsk Region and the Republic of Buryatia on the snow pollution in the Baikal region was analyzed (Obolkin et al., 2016; Molozhnikova et al., 2022). As shown by

*Corresponding author.

E-mail address: nchebun@lin.irk.ru (N.S. Chebunina)

Received: November 25, 2024; **Accepted:** December 20, 2024;

Available online: December 25, 2024

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



previous studies, the atmosphere of the Southern Baikal region is experiencing a tangible anthropogenic pressure. For instance, in 2022, air emissions from thermal power plants of the Irkutsk Region amounted to 270.4 thousand tons (State Report..., 2023).

The assessment of the degree of anthropogenic impact on the unique natural environment of Lake Baikal requires the study of the chemical composition of snow not only in areas with developed industry but also in non-industrial background area, the ecosystem of which is particularly sensitive to any negative impact. Precipitation in the Baikal Nature Reserve located on the southeast coast of Lake Baikal was studied in sufficient detail (Ermakova, 1998; Urbanavichene et al., 1998; Netsvetaeva et al., 2004; Molozhnikova et al., 2023a). The geochemical characteristics of the snow in the Northern Baikal region, which experiences less impact of human economic activity than the Southern Baikal region, were studied to a lesser extent (Khodzher, 1987; Belozertseva et al., 2018; Netsvetaeva et al., 2020; Belozertseva et al., 2023).

The Northern Baikal region is situated in the territory of the Irkutsk Region and the Republic of Buryatia. The climate in the Northern Baikal region is sharply continental. Based on the Nizhneangarsk weather station data, the average annual precipitation is ~353 mm. The highest amount of precipitation for the study period of 2022-2023 was recorded in January (35 mm). February was the least snowy month (6 mm). Northwesternly wind direction prevailed (Chronicle..., 2022; Weather..., 2022). The Severobaikalsk town and the Nizhneangarsk settlement are the largest populated areas, with a population of ~23 and 15 thousand people, respectively (All-Russian Census..., 2020). The main stationary sources of air pollution in Severobaikalsk include thermal power and industrial enterprises, automobile and rail transport, etc. In 2023, total emissions of pollutants from the stationary sources in Severobaikalsk amounted to 3.9 thousand tons (State Report..., 2024).

This study aimed to investigate the peculiarities of the chemical composition of the snow in the northern basin of Lake Baikal and to assess the accumulation level of major ions and biogenic elements in snow during the modern period.

2. Materials and methods

Snow surveys were carried out to assess the ecological state of the air in the northern basin of Lake Baikal and the number of pollutants entering the underlying surface in the cold season of 2022-2023 (from November to March) during the maximum snowfall accumulation in the Baikal region. Stable snow cover in this area formed in mid-November, 2022. Snow surveys were carried out from 8 to 12 March 2023. Sampling in the northern basin of Lake Baikal was carried out in the basin of the tributaries on the north and northwest coasts of Lake Baikal at the following sites (stations): the Upper Angara (stations 23 and 24), Kichera (station 21), Kholodnaya (station 22), and Tyya (station 14) rivers, Severobaikalsk (station 13), from the lake ice near the Kichera gap (stations 19 and 20), taiga zone along the 25N-152 Magistralny-Okunaiskiy and 25K-258 Ust-Kut-Severobaikalsk highways (stations 1-11) (hereinafter referred to as the Zhigalovo-Severobaikalsk highway). To exclude the influence of road dust and vehicle exhaust gases, sampling was carried out at a distance of 100-200 m from the roads. Moreover, on 20-28 February 2023, snow was sampled in other areas of the Baikal region, with no large industrial enterprises: on the southwest coast of Lake Baikal, in the Listvyanka settlement (stations 26 and 27), the southeast coast of the lake, in the basin of the Snezhnaya, Pereyomnaya, Khara-Murin, Solzan and Utulik rivers (stations 36-41), and in the forest along the 25N-209 Irkutsk - Listvyanka highway (stations 28-35) (Fig. 1).

To compare the obtained materials, data on the chemical composition of snow sampled in 2012, 2015, and 2020 at the same stations of the northern basin of

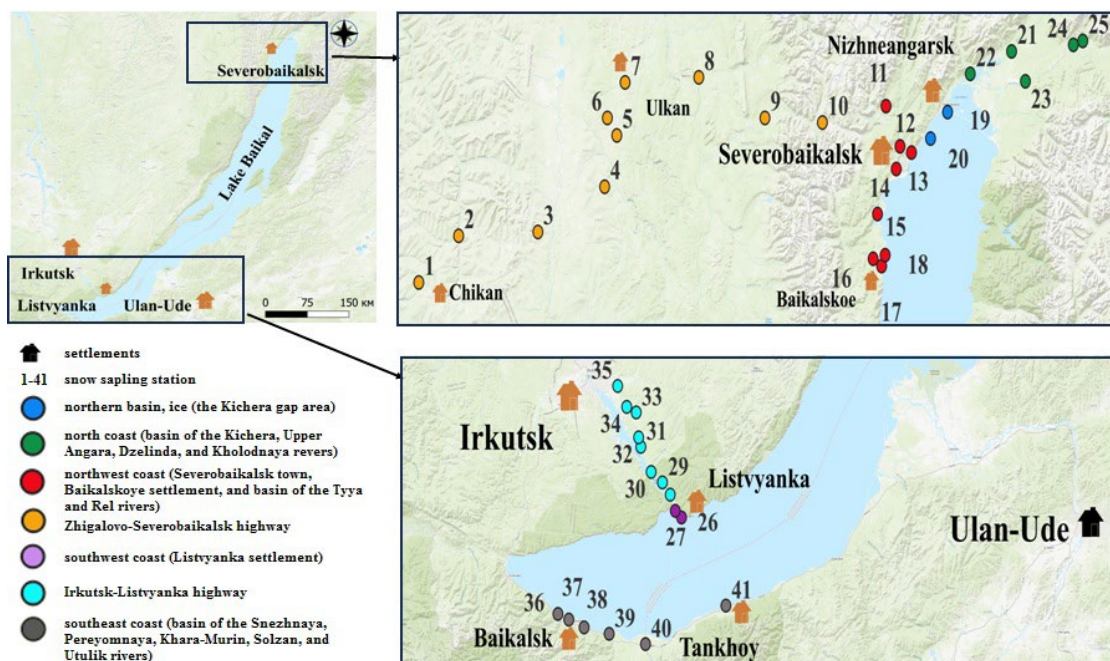


Fig.1. Map of snow sampling in the Baikal region in 2023.

Lake Baikal, as well as the 2022 data on the snow survey in industrial centers of the Baikal region (Irkutsk, Shelekhov, Angarsk, and Ulan-Ude cities), were used (Molozhnikova et al., 2023b). Table 1 shows the data on the number of samples and snow depth.

Overall, 66 snow cover samples (Table 1) were collected in the study area in 2023, and ~100 samples were collected in the northern basin of Lake Baikal between 2012 and 2020. Snow cores were sampled to the full snow depth, excluding the capture of soil particles, using a graduated plastic pipe with a diameter of 11 cm. On the lake ice, where the snow depth was small, samples were taken from a certain area with a plastic scoop. Stored snow cover moisture was determined as the ratio of melted sample volume to the area, from which the snow cover was sampled (Vasilenko et al., 1985). The chemical composition of snow melt water was determined through generally accepted hydrochemical methods (Khodzher et al., 2016; Analytical..., 2017) in the accredited Hydrochemistry and Atmosphere Chemistry Laboratory and Collective Instrumental Center at Limnological Institute SB RAS (Irkutsk). The concentrations of metal cations were determined by atomic absorption spectroscopy (contrAA 800 atomic absorption spectrometer, Germany), anions—by ion chromatography (Dionex ICS-3000 ion chromatograph, USA), biogenic elements—by photocolometric method (KFK-3-01-“ZOMZ” photoelectric photometer, Russia; SPEKS SSP-705M, Russia), and pH—by potentiometric method (“Expert-pH” pH meter, Russia).

3. Results and discussion

3.1. pH value in the snowmelt water from the northern basin of Lake Baikal

Snow melts on the coast of the northern basin of Lake Baikal in the winter of 2022-2023 had a slightly acidic reaction. The pH value ranged from 4.6 to 6.1, averaging 5.3 (Fig. 2). We recorded the minimum values on the coast of the Kichera River (station 21), and the maximum—on the coast of the Tyya River near Severobaikalsk (station 14). In this town, pH reached 7.2, which was likely due to the impact of emissions from thermal power plant and local boiler houses (alkaline components of ash from burnt fuel).

In the interannual dynamics, pH value in the snow melt water gradually decreased over the study years (Fig. 2). At the same time, from 2012 to 2023, the equivalent concentration ratios of major ions that determine precipitation acidity ($[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] / [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-]$) reduced from 1.5 to 0.9. This ratio is less than 1, which indicates incomplete acidity neutralization of strong acid anions in snow melt water. This resulted from a more significant increase in the calcium concentrations (by a factor of 4.6) compared to the concentrations of nitrates and sulfates (by a factor of 1.6. to 3.6) over the study period. The average concentration ratio of major neutralizing cations ($K = [\text{NH}_4^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+]$) to the anion concentration ($A = [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-]$), K/A , is 1, which, along with low mineralization, indicates

Table 1. Study area and the number of snow sampling sites in the Baikal region in 2023.

Study area	Number of samples	Snow depth, cm
Northern basin of Lake Baikal, ice	6	15-35 (26)
North coast	5	65-94 (79)
Northwest coast	9	18-48 (32)
Zhigalovo-Severobaikalsk highway	12	33-147 (64)
Southwest coast (Listvyanka settlement)	11	1-52 (35)
Irkutsk-Listvyanka highway	8	30-60 (47)
Southeast coast	15	47-83 (65)

Note: average values are given in brackets.

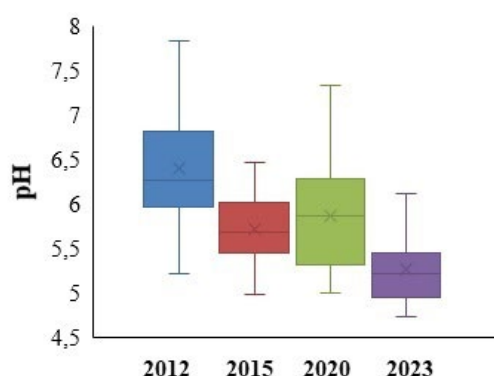


Fig. 2. pH value in the snow melt water in the northern basin of Lake Baikal in March 2012, 2015, 2020, and 2023.

that at present the system is still in a state of equilibrium, i.e. there is no current snow cover acidification on the coast of the northern basin of Lake Baikal (Komov and Lazareva, 1994; Vasilevich et al., 2011) (Table 2). Although noteworthy is that from 2012 to 2023, there was a trend of a gradual decrease in this ratio from 1.6 to 1.0

The average pH value for the four-year observation period was 5.9, which is typical of unpolluted atmospheric precipitation. The obtained pH values are comparable with corresponding average values of precipitation in 2023 at ten background Russian stations included in the World Meteorological Organization (WMO) Global Atmosphere Watch Programme, for which this parameter ranges from 5.5. to 6.5 (Perschina et al., 2024). The average pH value in the snow cover on the coast of the northern basin of Lake Baikal (5.3) in 2023 was comparable with those in the southwest and southeast coasts of the lake that are not directly affected to emissions from large industrial enterprises (5.0-5.3). However, it was higher than pH values characteristic of the snow cover in the Arctic areas (4.97) and the background area of Lake Baikal—the Baikal-Lena Nature Reserve (4.96) (Netsvetaeva et al., 2020; Shevtsova et al., 2022). In the taiga zone, near Zhigalovo-Severobaikalsk highway, the average pH value was higher and ranged from 4.9 to 7.3.

Table 2. Ratios of equivalent concentrations of major ions in the snow melt water from the northern basin of Lake Baikal in 2023.

Ratio	The coast of the Lake Baikal northern basin	Zhigalovo-Severobaikalsk highway
$[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{NO}_3^-]$	0.8	0.8
$[\text{NH}_4^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+]/[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-]$	1.0	2.8
$[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}]/[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-]$	0.9	3.0

3.2. Major ions in the snow meltwater from the northern basin of Lake Baikal

The distribution of major ions in the snow cover on the coast of the northern basin of Lake Baikal was as follows: $\text{Ca}^{2+} > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{H}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$ (Fig. 3).

The chemical composition of the snow cover on the coast of the northern basin of Lake Baikal and in the industrial centers of the Baikal region differed significantly in the relative concentrations of major cations and anions. Calcium (30 eq%) and hydrogen (12 eq%) predominated in the cation composition of the snow-melt water from the coast of the northern basin of Lake Baikal, while nitrates (19 eq%)—in the anion composition. The ratio of equivalent concentrations, $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{NO}_3^-] = 0.8$ (Table 2) also evidences the leading role of nitrates among anions. Nitrates also dominated over sulfates on the southeast coast of Lake Baikal where the relative concentration of nitrates was 20 eq%, with the $[\text{SO}_4^{2-}]/[\text{NO}_3^-]$ ratio of 0.7. This anion distribution is typical of unpolluted background areas because of the long-range transport of nitrogen oxides (Obolkin et al., 2016; Sicard et al., 2023). In 2022, in the snow cover

of the industrial cities in the Baikal region, sulfates, fluorides, and bicarbonates prevailed among anions, and calcium, magnesium, and sodium—among cations (Fig. 3). Such a ratio of major ions is usually characteristic of snow cover in large industrial centers where the impact of fuel and energy complex and industrial enterprises is significant (Novorotskaya, 2018; Gladun et al., 2024). For instance, in the Ulan-Ude city, the relative sulfate concentrations reached 18-23 eq%, while the nitrate concentrations did not exceed 5-9 eq%.

The snow cover on the coast of the northern basin of Lake Baikal was highly correlated ($r = 0.7-1.0$) between the following pairs of ions: $\text{SO}_4^{2-}-\text{Ca}^{2+}$, $\text{HCO}_3^- - \text{Mg}^{2+}$, $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$, $\text{SO}_4^{2-} - \text{Mg}^{2+}$, and $\text{HCO}_3^- - \text{NH}_4^+$. This indicates their common sources mainly of terrigenous origin (Fig. 4).

Figure 5a shows a schematic map of the distribution of major ions in the snow cover of the northern basin of Lake Baikal in 2023 based on the Q GIS software package. The size of each cartodiagram corresponds to a certain value of the total amount of ions calculated for each snow cover sampling station. These cartodiagrams allow simultaneous display of the concentrations of all ions and identification of the most

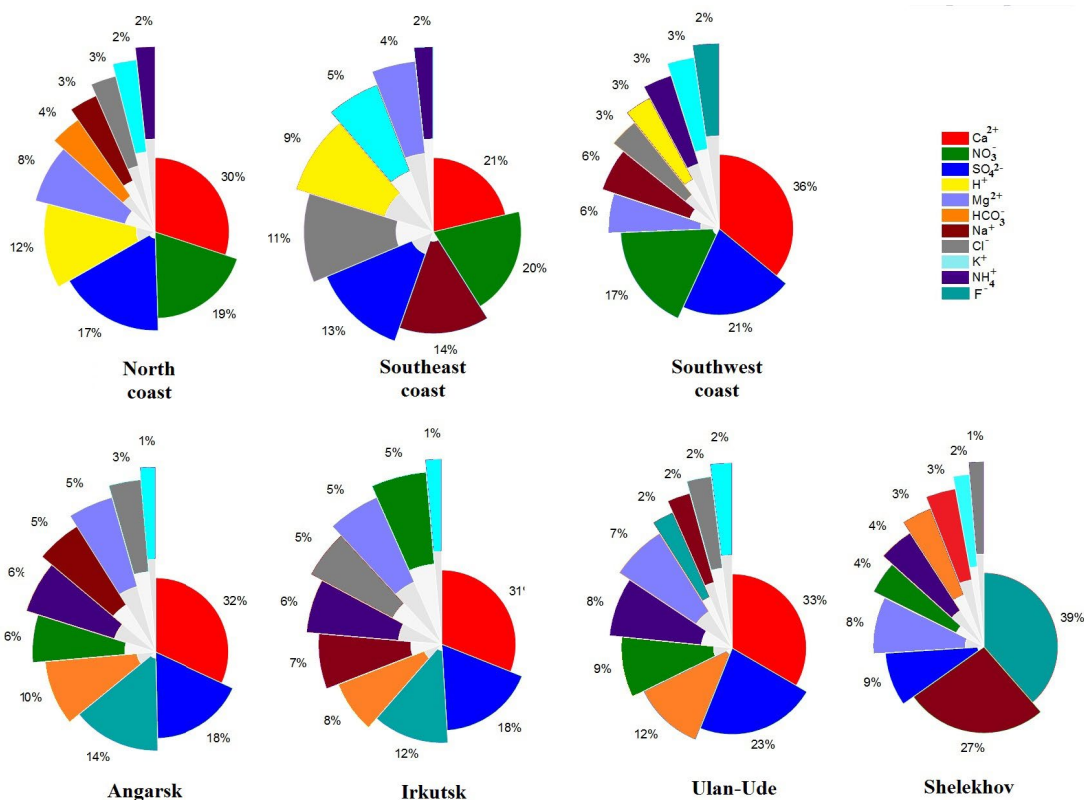


Fig.3. Average relative ionic concentration (eq%) in the snow of the Baikal region in 2022-2023.

polluted areas. To compare the results, we constructed a similar schematic map of the spatial distribution of major ions for the Southern Baikal region (Fig. 5b).

On the coast of the northern basin, the total amount of ions (Σ_i) ranged from 1.2 to 6.9 mg/L and averaged 2.7 mg/L. These values were comparable with the minimum values recorded on the southeast coast of the lake, in the basin of the Snezhnaya and Khara-Murin rivers (stations 37 and 38, respectively) (Fig. 5a, b), and with regional background values in the Baikal-Lena Nature Reserve (3 mg/L) (Netsvetaeva et al., 2020). This value was 8 to 20 times lower than in the large industrial centers of the Southern Baikal region (Molozhnikova et al., 2023b).

As shown in Fig. 5a, the snow cover at station 13 (Severobaikalsk) had the highest total ionic concentration (up to 31 mg/L) due to the impact of anthropogenic sources of air pollution in the town. We recorded the minimum values in the samples taken from the ice of Lake Baikal near the Kichera gap, 1.2 mg/L (station 20), and in the basin of the Kichera, Upper Angara, and Dzelinda rivers, up to 2.6 mg/L (stations 21, 23, 24, and 25, respectively). Notably, pH values at these stations were small (5.2 on average). Relative remoteness of these areas from anthropogenic pollution sources explains low pH and Σ_i values in the snow cover. In the snow cover of the taiga zone near the Zhigalovo-Severobaikalsk highway, the total amount of ions varied widely, from 1.1. to 17.1 mg/L (4.1. mg/L on aver-

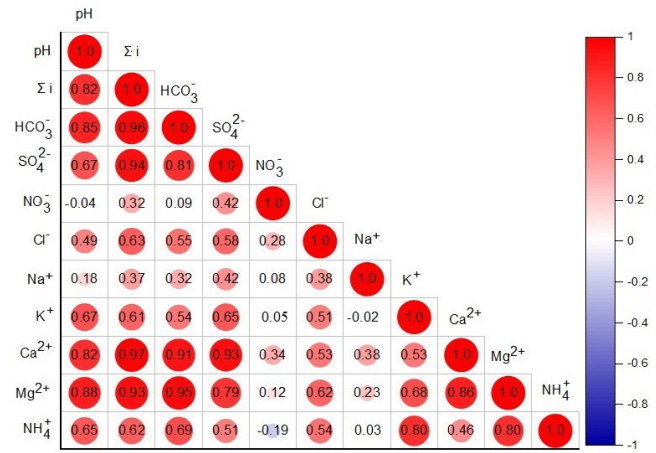


Fig.4. Pearson correlation coefficients between the ionic concentrations in the snow cover on the coast of the northern basin of Lake Baikal in 2023.

age). We recorded the maximum Σ_i 105 km away from the Zhigalovo settlement (station 2), which was due to high air dustiness at this sampling site. Low Σ_i values were observed on the border of the Irkutsk Region and the Republic of Buryatia where the snow cover depth was maximum (station 10). Compared to the previous snow survey data, Σ_i on the coast of the northern basin of Lake Baikal showed a two- to fivefold decrease (Fig. 6). Based on the concentrations of major ions and pH

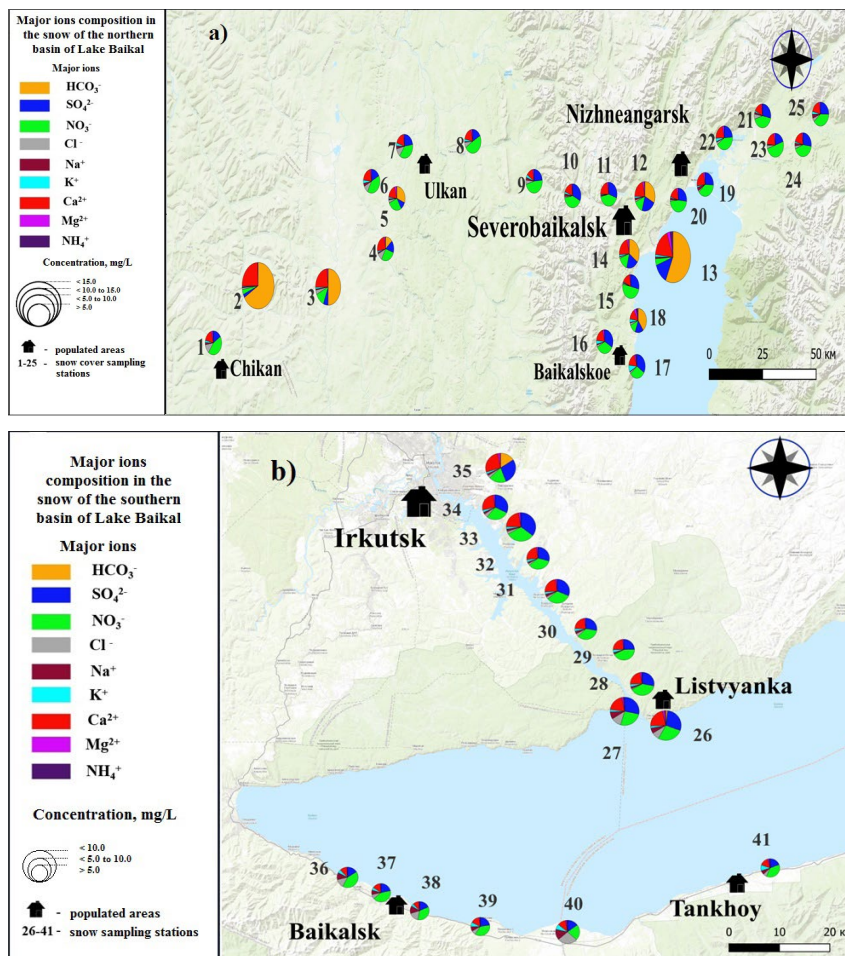


Fig.5. Schematic map of the distribution of major ions in the snow cover of the Baikal region in 2023 (a-northern basin of Lake Baikal; b-southern basin of Lake Baikal).

values, we classified stations 10, 20, 21, 23, 24, and 25 as a background for the northern basin of Lake Baikal and the entire Baikal region.

Table 3 shows the average concentrations of major ions in the snow cover on the coast of the northern basin for the four-year observation period (2012, 2015, 2020, and 2023). The concentrations of most ions varied significantly depending on the type of terrain and proximity to industrial zones and transportation routes.

The average concentration of major ions in the snow cover of the northern basin of Lake Baikal in 2023 was 2 to 23 times lower than in 2012 (Table 3). A similar trend can be traced in other regions of Russia. For example, between 2019 and 2023, the average concentrations of major air pollutants and the emissions from stationary sources and motor vehicles mainly decreased in the Russian cities. Total sulfur dioxide emissions from stationary and mobile sources reduced by 11%, and nitrogen oxide emissions—by 2% (Yearbook of the state..., 2024).

3.3. Biogenic elements in the snowmelt water from the northern basin of Lake Baikal

Mineral and total nitrogen. The average concentration of mineral nitrogen in the snow cover of the northern basin of Lake Baikal was 0.22 mg/L, ranging from 0.13 to 0.28 mg/L. The total nitrogen concentration at different sites of the study area was from 1.8 to 2.2 times higher. We recorded the maximum concentration of mineral and total nitrogen in the vicinity of Severobaikalsk (station 12). The bulk of nitrogen outside the zone of anthropogenic impact had mineral forms (56-60%). In areas with elevated anthropogenic pressure (vicinities of Severobaikalsk, the coast at the estuary of the Tyya River, the Baikalskoye settlement, at the 105th km of the northern highway), in 2023, up to 77% of nitrogen was organic. Calculation of the ratio of different forms of nitrogen in the snowmelt water indicated the predominance of nitrate nitrogen over ammonia nitrogen.

Table 3. Average concentrations of major ions (mg/L) in the snow cover of the northern basin of Lake Baikal in 2012, 2015, 2020, and 2023.

Study area	Period	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
Northern basin of Lake Baikal, ice	2012	3.6	2.33	1.64	0.17	0.21	0.08	1.80	0.28	0.05
	2015	0.8	0.57	0.69	0.09	0.08	0.03	0.53	0.09	0.01
	2020	3.5	1.31	1.75	0.11	0.36	0.12	1.34	0.35	0.05
	2023	0	0.47	0.80	0.03	0.05	0.03	0.32	0.05	0.03
	μ	2.0	1.17	1.22	0.10	0.18	0.07	1.00	0.19	0.04
	Σ	1.8	0.86	0.55	0.06	0.14	0.04	0.69	0.15	0.02
	CV, %	94	73	45	58	81	67	69	75	55
North coast	2012	0.4	0.64	1.06	0.21	0.1	0.11	0.49	0.07	0.11
	2015	0.1	0.67	0.78	0.08	0.06	0.05	0.33	0.06	0.11
	2020	0.3	0.53	1.03	0.07	0.03	0.12	0.70	0.08	0.05
	2023	0	0.54	0.91	0.10	0.05	0.06	0.40	0.06	0.01
	μ	0.2	0.60	0.95	0.12	0.06	0.09	0.48	0.07	0.07
	Σ	0.2	0.07	0.13	0.06	0.03	0.04	0.16	0.01	0.05
	CV, %	91	12	14	56	49	41	33	14	70
Northwest coast	2012	11	4.42	1.55	0.16	0.14	0.24	4.51	0.49	0.29
	2015	3.4	1.79	0.88	0.17	0.10	0.56	1.03	0.23	0.34
	2020	1.7	1.41	1.18	0.10	0.06	0.37	1.19	0.22	0.26
	2023	1.1	0.96	0.84	0.09	0.05	0.14	0.79	0.13	0.07
	μ	4.3	2.15	1.11	0.13	0.09	0.33	1.88	0.27	0.24
	Σ	4.6	1.55	0.33	0.04	0.04	0.18	1.76	0.16	0.12
	CV, %	106	72	30	31	47	55	94	58	49
Zhigalovo-Severobaikalsk highway	2012	1.4	0.47	1.00	0.09	0.07	0.10	0.59	0.09	0.09
	2015	1.9	0.59	0.72	0.16	0.08	0.13	0.76	0.10	0.12
	2020	2.6	0.65	0.84	0.10	0.06	0.10	1.10	0.13	0.03
	2023	1.8	0.44	0.83	0.19	0.07	0.07	1.01	0.07	0.02
	μ	1.9	0.54	0.85	0.14	0.07	0.10	0.87	0.10	0.07
	Σ	0.5	0.10	0.12	0.05	0.01	0.02	0.23	0.03	0.05
	CV, %	26	18	14	36	12	24	27	26	74

Note: μ – average value; Σ – standard deviation; CV – coefficient of variation, %.

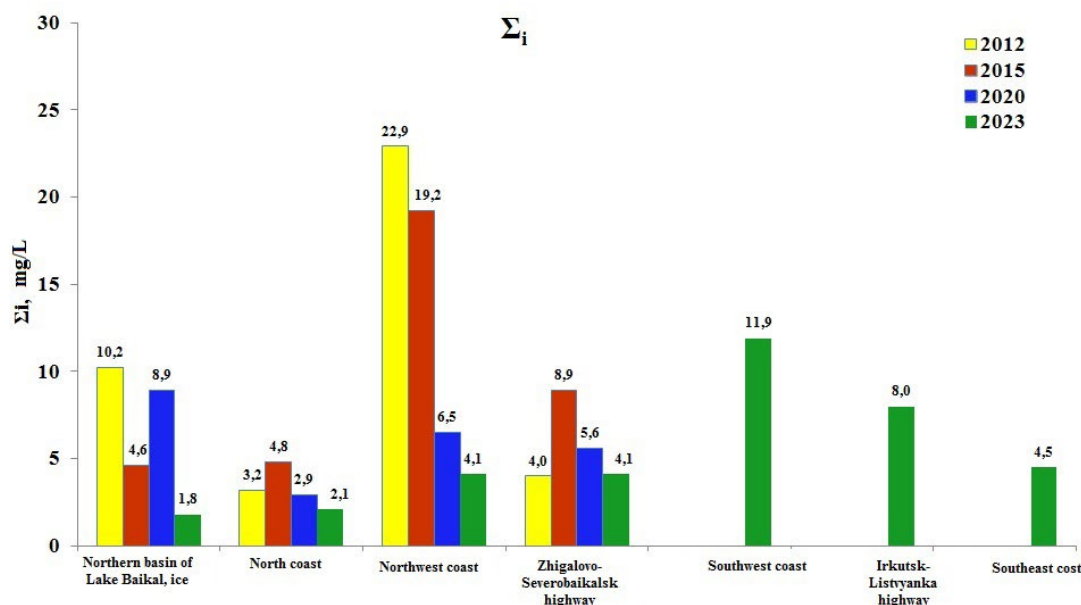


Fig.6. Average amounts of ions (mg/L) in the snow cover of the Baikal region over the four-year observation period.

Unlike other ions, the concentrations of nitrate nitrogen were evenly distributed in the snow cover of the northern basin of Lake Baikal. The concentration of this element in 2023 averaged 0.19 mg/L, which was two to five times lower than similar values in other areas of the Baikal region. Insignificant variation in the concentrations of nitrate nitrogen (26% on average) in comparison with other ions evidences the predominance of transboundary and regional background components over the influence of local air pollution sources (Table 3). In clean areas, the proportion of nitrate nitrogen was 96-97% of its total concentration and decreased to 77% in the vicinities of Severobaikalsk. In Severobaikalsk itself, ammonia nitrogen dominated (up to 70%), indicating its anthropogenic origin.

Mineral and total phosphorus. The concentration of mineral phosphorus in the snow cover of the northern basin ranged from 0.3 to 33 $\mu\text{g/L}$, and the total phosphorus concentration—from 3 to 61 $\mu\text{g/L}$. We observed the maximums of average values of these elements (14 and 33 $\mu\text{g/L}$, respectively) on the northwest coast, near the Severobaikalsk town and the Baikalskoye settlement. Noteworthy is that obtained values were rather high at this site, which was likely due to the increased natural background, the presence of phosphorus compounds in the soil (Belozertseva et al., 2023), and anthropogenic pollution.

3.4. Pollutant accumulation in the snow cover of the northern basin of Lake Baikal

We determined pollutants entering the underlying surface in the northern basin of Lake Baikal based on the results of chemical analysis of samples of the snow cover that formed during the winter (November to February-March) (Table 4). The accumulation of chemical elements in the snow cover depends on the stored snow moisture and the concentrations of the elements to be determined.

The total accumulation of ions characterizes the overall pollution of the snow cover. In the northern basin of Lake Baikal, this value over four years of observations ranged on average from 230 to 440 mg/m^2 . In 2023, we determined the highest Σ_i accumulation in the taiga zone of the Zhigalovo-Severobaikalsk highway owing to the large volume of the stored snow moisture in some areas of this route (up to 135 mm). The minimum accumulation in 2023 was recorded on the lake ice where stored moisture was ~ 50 mm. Moreover, the period of accumulation of the studied elements in the snow cover on the lake ice was two times lower than on the coast. To correctly compare the accumulation values on the ice and on the coast, we doubled the calculated data on the accumulation in the water area of the lake (Table 4). The comparison revealed that the Σ_i accumulation in the snow cover of the northern basin of Lake Baikal was two times lower than in the southern basin and two to six times lower than in the industrial centers of the Southern Baikal region (Table 4).

The **calcium** (the main alkaline element) accumulation in the snow cover of the northern basin for the study period ranged on average from 40 to 70 mg/m^2 . In 2023, this value was 1.3 and 2.3 times lower than that on the southeast and southwest coasts of Lake Baikal, respectively. Compared to the industrial centers in the Baikal region (except for the Shelekhov city), this value was two to six times lower.

The most significant for non-industrial “clean” areas is the accumulation of acidic elements such as **sulfate sulfur** ($\text{S}(\text{SO}_4^{2-})$), **mineral nitrogen** ($\Sigma N_{\text{mineral}} = \text{N}(\text{NO}_3^-) + \text{N}(\text{NH}_4^+)$), and **hydrogen ions** (H^+). The total accumulation of mineral nitrogen in the northern basin of Lake Baikal during the study years was 16-27 mg/m^2 . In 2023, we recorded the highest values on the ice of the Umbrella River (station 8) and near the Kunerma settlement (station 9) where the stored moisture was maximum (190-215 mm). The minimum values of the nitrogen accumulation (less than 10 mg/m^2) were observed on the west coast and on the ice of

Table 4. Accumulation of chemical elements (mg/m²) and stored moisture (mm) in the snow cover of the Baikal region in 2022-2023.

Study area	HCO ₃ ⁻	S(SO ₄ ²⁻)	N _{mineral}	Ca ²⁺	H ⁺	P _{mineral}	Σ _i	Stored moisture, mm
Northern basin of Lake Baikal, ice	0	<u>12-20</u> 14	<u>12-22</u> 18	<u>22-38</u> 30	<u>0.6-1.4</u> 1.0	<u>0.02-0.2</u> 0.1	<u>124-214</u> 164	<u>32-55</u> 47
North coast	0	<u>10-27</u> 19	<u>11-28</u> 22	<u>22-54</u> 42	<u>0.3-2.0</u> 0.9	<u>0.04-0.8</u> 0.3	<u>117-291</u> 225	<u>72-150</u> 106
Northwest coast	<u>0-108</u> 45	<u>8-25</u> 14	<u>7-14</u> 11	<u>14-70</u> 35	<u>0.03-1.0</u> 0.3	<u>0.2-1.6</u> 0.7	<u>76-335</u> 180	<u>29-59</u> 44
Zhigalovo-Severobaikalsk highway	<u>0-1522</u> 192	<u>7-24</u> 14	<u>8-41</u> 20	<u>16-563</u> 101	<u>0.01-2.8</u> 0.7	<u>0.06-1.6</u> 0.7	<u>92-2288</u> 460	<u>46-215</u> 108
Southern basin of Lake Baikal	<u>0-170</u> 6	<u>1-120</u> 50	<u>10-105</u> 50	<u>3-285</u> 115	<u>0-4.2</u> 0.9	<u>0-1.3</u> 0.2	<u>280-1270</u> 610	<u>1-190</u> 100
Shelekhov*	<u>33-350</u> 92	<u>20-160</u> 60	<u>20-235</u> 50	<u>1-190</u> 40	<u>0-0.04</u> 0.02	<u>0.03-1.6</u> 0.2	<u>260-2130</u> 820	<u>20-50</u> 35
Irkutsk*	<u>5-1055</u> 130	<u>15-135</u> 66	<u>8-66</u> 36	<u>25-420</u> 150	<u>0-0.38</u> 0.04	<u>0.02-3.6</u> 0.4	<u>175-2035</u> 680	<u>20-62</u> 33
Angarsk*	<u>7-8100</u> 630	<u>17-850</u> 105	<u>20-60</u> 32	<u>35-3135</u> 320	<u>0-0.07</u> 0.02	<u>0-1.8</u> 0.2	<u>190-14900</u> 1460	<u>12-45</u> 27
Ulan-Ude*	<u>0-320</u> 120	<u>25-340</u> 60	<u>15-70</u> 35	<u>40-190</u> 110	<u>0-0.09</u> 0.02	<u>0.2-2.6</u> 0.7	<u>200-2280</u> 540	<u>11-36</u> 20

Note: *- the 2022 data.

Lake Baikal where the stored moisture was seven times lower. Compared to the southern basin of Lake Baikal, the mineral nitrogen accumulation was three times lower.

The accumulation of **sulfate sulfur** in the snow cover of the northern basin of Lake Baikal in the study years ranged from 14 to 25 mg/m², with the minimum values recorded in 2023. Analysis of the obtained data indicated that the average accumulation of sulfur in the snow cover of the northern basin of Lake Baikal was three to seven times lower than on the south coast of the lake and in the industrial cities of the Baikal region, respectively.

As shown in Table 3, the H⁺ accumulation in the snow cover of the northern basin of Lake Baikal was on average 1.2. times lower than in the southern basin. This is associated with both a lower stored snow moisture in the north of the lake and higher pH values in the snowmelt water.

The P_{mineral} accumulation in the snow cover of some areas on the northwest coast of Lake Baikal and in the taiga zone along the northern highway was rather high. It was comparable to the similar value in the Ulan-Ude city and was two to four times higher than in the industrial centers of the Southern Baikal region.

4. Conclusion

Currently, the snow cover in the northern basin of Lake Baikal shows low mineralization and dominance of nitrates in the anion composition. In the inter-annual dynamics, the total amount of ions and pH in the snowmelt water gradually decreased over the study years. Nitrate nitrogen was the predominant form of mineral nitrogen in the snowmelt water. The bulk of

chemical elements had lower concentrations than on the southwest coast of the lake and were comparable to regional background values. The concentrations of mineral phosphorus in the snow cover of some areas of the northern basin of Lake Baikal were rather high due to the increased natural background and anthropogenic pollution.

The accumulation of the total amount of ions, calcium, sulfate sulfur, and mineral nitrogen in the snow cover of the northern basin of Lake Baikal was two-three times lower than in the southern basin and two to seven times lower than in the industrial centers of the Southern Baikal region. The accumulation of mineral phosphorus in some areas of the northern basin was comparable to the corresponding value in the Ulan-Ude city and two to four times higher than in the industrial centers of the Southern Baikal region.

Based on the concentrations of major ions and pH values, we identified areas that can be considered background for the northern basin of Lake Baikal and the entire Baikal region. The relative remoteness of these areas from large sources of anthropogenic pollution explains the low concentration of the total amount of ions and pH value.

Acknowledgements

This study was carried out within the framework of the LIN SB RAS State Project No. 0279-2021-0014 “Study of the role of precipitation for aquatic and terrestrial ecosystems of the Lake Baikal basin, identification of air pollution sources”.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Afonina T.E. 2024. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the snow cover of the Baikal region and the Baikal Lake basin. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta, Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology] 2: 114-119. DOI: [10.17308/geo/1609-0683/2024/2/114-119](https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/2/114-119) (in Russian)
- All-Russian population census. 2020. Volume 1. Population size and distribution, federal state statistics service (Rosstat). URL: https://rosstat.gov.ru/vpn_popul (accessed on 02 October 2024). (in Russian)
- Analytical, kinetic and calculation methods in hydrochemical practice. 2017. In: Lazovik P.A., Yefremenko N.A. (Eds.). St. Petersburg: Nestor-Istoriya. (in Russian)
- Belozertseva I.A., Vorobeva I.B., Vlasova N.V. et al. 2018. Ecological status of the coast of Lake Baikal and its influence on the lake pollution. *Uspekhi sovremennoego estestvoznaniya* [Advances in current natural sciences] 11: 85-95. DOI: [10.17513/use.36910](https://doi.org/10.17513/use.36910) (in Russian)
- Belozertseva I.A., Vorobjeva I.B., Vlasova N.V. 2023. Pollution of snow and soils of the northwest coast of the Baikal Lake. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya* [Proceedings of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology] 1: 76-92. DOI: [10.17308/geo/1609-0683/2023/1/76-92](https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2023/1/76-92) (in Russian)
- Chebykin E.P., Dambinov YU.A., Khakhuraev O.A. et al. 2018. Sources of chemical elements in the snow cover in the shore zone of the settlement of Listvyanka (Lake Baikal). *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources] 3: 74-85. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2018-3\(74-85\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(74-85)) (in Russian)
- Chizhova J.N., Vasilchuk J.Y., Yoshikawa K. et al. 2015. Isotope composition of snow cover in the Lake Baikal area. *Led i sneg* [Ice and Snow] 55(3): 55-66. DOI: [10.15356/2076-6734-2015-3-55-66](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-3-55-66) (in Russian)
- Ermakova O.D. 1998. Dependence of functioning of individual components of ecosystems of the Baikal Reserve on acidity of atmospheric deposition. In: Problems of environmental monitoring. Proceedings of the 10th Baikal Workshop, pp. 106-118. (in Russian)
- Gladun I.V., Shelganova A.A., Mayorova L.P. 2024. Technogenic pollution of snow cover in the Khabarovsk Territory in the period from 2015 to 2022. *The Eurasian Scientific Journal* 16(3): 94NZVN324. Available at: URL: <https://esj.today/PDF/94NZVN324.pdf> (in Russian)
- Khodzher T.V., Domyshva V.M., Sorokovikova L.M. et al. 2016. Part II. Method and case studies for understanding and monitoring the landscapes of Siberia. Chapter 3. Methods for monitoring the chemical composition of Baikal water. In: Mueller L. et al. (Ed.), *Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia*. Cham, pp. 113-132. DOI: [10.1007/978-3-319-24409-9_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24409-9_3)
- Khodzher T.V. 1983. Chemical composition of precipitation. *Ecology of the southern basin of Lake Baikal*. pp. 44-50. (in Russian)
- Khodzher T.V. 1987. Input of substances from the atmosphere in the Baikal region and their role in the chemical balance of Lake Baikal. Dissertation for the degree of candidate of geographical sciences, Leningrad, Russia. (in Russian)
- Komov V.T., Lazareva V.I. 1994. Causes and consequences of anthropogenic acidification of surface waters in the northern region on the example of a comparative limnological study of lake ecosystems in the Darwin Reserve. *Trudy Instituta Biologii Vnutrennikh Vod RAN* [Proceedings of the Institute of Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences] 70: 3–30. (in Russian)
- Mamontov A.A., Tarasova E.N., Mamontova E.A. 2006. Persistent organic pollutants of the Baikal region (polychlorinated biphenyls and organochlorine pesticides). *Trudy gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika «Bajkalo-Lenskij»* [Proceedings of the Baikal-Lena State Nature Reserve] 4: 15-24. (in Russian)
- Marinaite I.I. 2005. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the environment of the Baikal region. Dissertation for the degree of candidate of chemical sciences, Institute of Geography SB RAS, Russia. (in Russian)
- Molozhnikova E.V., Golobokova L.P., Marinaite I.I. et al. 2023. Chemical compound of atmospheric deposition in the Baikal State Biospherical Nature Reserve (the eastern coast of Southern Baikal). *Russian Meteorology and Hydrology* 48: 291–299. DOI: [10.3103/S1068373923040015](https://doi.org/10.3103/S1068373923040015)
- Molozhnikova Y.V., Shikhovtsev M.Y., Netsvetaeva O.G. et al. 2023. Ecological Zoning of the Baikal Basin Based on the Results of Chemical Analysis of the Composition of Atmospheric Precipitation Accumulated in the Snow Cover. *Applied Sciences* 13(8171): 1-17. DOI: [10.3390/app13148171](https://doi.org/10.3390/app13148171)
- Molozhnikova Y.V., Shikhovtsev M.Yu., Marinaite I.I. et al. 2022. Spatial distribution of anthropogenic tracers in the snow cover of the Southern Baikal region. *Proceedings of SPIE* 12341: 1-7. DOI: [10.1117/12.2644206](https://doi.org/10.1117/12.2644206)
- Netsvetaeva O.G., Khodzher T.V., Golobokova L.P. et al. 2004. Chemical composition of snow in the Baikal region nature reserves. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and Natural Resources] 1: 66-72. (in Russian)
- Netsvetaeva O.G., Onishchuk N.A., Marinaite I.I. et al. 2020. Chemical composition of snow cover in specially protected, non-industrial, and industrial areas of the Baikal region. *Proc. SPIE* 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics 115603N. DOI: [10.1117/12.2575035](https://doi.org/10.1117/12.2575035)
- Nikonova A.A., Gorshkov A.G. 2007. Modern levels of the accumulation of polychlorinated diphenyls in the objects of the Baikal Natural Territory. *Chemistry for Sustainable Development* 15(3): 359-365.
- Novorotskaya A.G. 2018. On the results of chemical monitoring of snow cover of Khabarovsk. *Advances in current natural sciences* 12 (2): 374-379. DOI: [10.17513/use.37023](https://doi.org/10.17513/use.37023) (in Russian)
- Obolkin V., Khodzher T., Sorokovikova L. et al. 2016. Effect of long-range transport of sulphur and nitrogen oxides from large coal power plants on acidification of river waters in the Baikal region, East Siberia. *International Journal of Environmental Studies* 73(3): 452-461.
- Obolkin V.A., Khodzher T.V. 1990. Annual atmospheric input of sulfates and mineral nitrogen in the Lake Baikal region. *Russian Meteorology and Hydrology* 7: 71-76. (in Russian)
- Onishchuk N.A., Netsvetaeva O.G., Molozhnikova E.V. 2023. Interannual dynamics of the chemical composition of snow cover in the Baikal region. *Russian Meteorology and Hydrology* 48: 309–315. DOI: [10.3103/S1068373923040039](https://doi.org/10.3103/S1068373923040039)
- Paradina L.F., Khakhuraev O.A., Vodneva E.N. et al. 2016. Snow in assessing the ecological state of the southern basin of Lake Baikal before and after the closure of the Baikal Pulp and Paper Mill. *Analytics of Siberia and the Far East: X All-Russian scientific conference with international participation*. Barnaul. Altai State University. (in Russian)
- Pershina N.A., Pavlova M.T., Efimova O.N. et al. 2024. Ionic composition of atmospheric precipitation at Russian stations included in the WMO Global Atmosphere Watch system. Review of the state and pollution of the environment in the Russian Federation for 2023. Moscow, pp. 47-54. (in Russian)
- Shen J., Song Y., Cheng C. et al. 2023. Spectroscopic and compositional profiles of dissolved organic matters in urban snow from 2019 to 2021: Focusing on pollution features iden-

tification. *Water Research* 229 (119408): 1-9. DOI: [10.1016/j.watres.2022.119408](https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119408)

Shevtsova O.V., Dobrotina E.D., Goncharova A.B. et al. 2022. Chemical characteristics of snow cover in the high-latitude Russian Arctic (Baranov Cape, Bolshevik Island, Severnaya Zemlya). *Led i sneg [Ice and Snow]* 62(4): 564-578. DOI: [10.31857/S2076673422040152](https://doi.org/10.31857/S2076673422040152) (in Russian)

Sicard P., Agathokleous E., Anenberg S.C. et al. 2023. Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective. *Science of The Total Environment* 858 (160064): 1-13. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.160064](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160064)

Sorokovikova L.M., Netsvetaeva O.G., Tomberg I.V. et al. 2004. Effect of atmospheric precipitation on the chemical composition of river waters in the South Baikal. *Atmospheric and Oceanic Optics* 17(5-6): 373-377.

State report "On the state and protection of the environment of the Irkutsk Region in 2022". 2023. Ministry of Natural Resources and Ecology of the Irkutsk Region. Irkutsk. (in Russian)

State report "On the state and protection of the environment of the Republic of Buryatia in 2023". 2024. Ministry of Natural Resources and Environment of the Republic of Buryatia. Ulan-Ude. (in Russian)

Szumińska D., Potapowicz J., Szopińska M. et al. 2021. Sources and composition of chemical pollution in Maritime Antarctica (King George Island). Part 2: Organic and inorganic chemicals in snow cover at the Warszawa Ice field. *Science of the Total Environment* 796 (149054): 1-13. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.149054](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149054)

Thapa P., Xu J., Neupane B. et al. 2020. Chemical composition of inorganic and organic species in snow/ice in the glaciers of western China. *Science of the Total Environment* 135351: 1-9. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.135351](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135351)

Tomberg I.V., Sorokovikova L.M., Netsvetaeva O.G. et al. 2016. Chemical composition and trends of oxidation of snow waters and waters of South Baikal tributaries. *Optika atmosfery i okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]* 29(6): 516-520. DOI: [10.15372/AOO20160612](https://doi.org/10.15372/AOO20160612) (in Russian)

Urbanavichene I.N., Urbanavichus G.P., Khodzher T.V. 1998. Monitoring of precipitation pollution in the Baikal Biosphere Reserve. *Problems of environmental monitoring. Proceedings of the 10th Baikal Workshop*. Baikalsk. Institute of Environmental Toxicology. pp. 181-187. (in Russian)

Valikova V.I., Matveyev A.A., Chebanenko B.B. 1985. Input of some substances with atmospheric precipitation in the Lake Baikal region. Improving regional monitoring of the state of Lake Baikal. Leningrad: Gidrometeoizdat. pp. 58-66. (in Russian)

Vasilenko V.N., Nazarov I.M., Fridman Sh.D. 1985. Monitoring of snow cover pollution. Leningrad: Gidrometeoizdat. (in Russian)

Vasilevich M.I., Beznosikod V.A., Kondratenok B.M. 2011. Chemical composition of snow cover in the taiga zone of the Komi Republic. *Water Resources* 38: 530-542. DOI: [10.1134/S0097807811040130](https://doi.org/10.1134/S0097807811040130)

Vorobjeva I.B., Vlasova N.V., Gagarinova O.V. 2016. Current state of the Listvyanka settlement environment according to the sties of vegetation, surface water and snow cover. *Geography and Natural Resources* 6: 93-98. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(93-98\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(93-98))

Votintsev K.K., Khodzher T.V. 1981. Chemical composition of precipitation near Lake Baikal. *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and Natural Resources]* 4: 100-105. (in Russian)

Votintsev K.K. 1954. Chemical composition of atmospheric precipitation waters in the Baikal region. *Doklady Akademii Nauk [Reports of the Academy of Sciences]* 95 (5): 979-981. (in Russian)

Wang Y., Bian J., Zhao Y. et al. 2018. Assessment of future climate change impacts on nonpoint source pollution in snowmelt period for a cold area using SWAT. *Scientific reports* 8: 2402. DOI: [10.1038/s41598-018-20818-y](https://doi.org/10.1038/s41598-018-20818-y)

Weather and climate. 2022. Weather chronicle in Nizhneangarsk. Monthly and annual precipitation amounts in Nizhneangarsk. URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/30433_2.htm (accessed on 25 September 2024)

Weather in the town of Severobaikalsk. 2022. URL: <https://weatherarchive.ru/Temperature/Severobaikalsk/November-2022> (accessed on 22 September 2024)

Yanchuk M.S. 2018. Study of oil products waste distribution and estimation of Lake Baikal's snow cover pollution with it. *Geodesy and cartography* 79(8): 60-64. DOI: [10.22389/0016-7126-2018-938-8-60-64](https://doi.org/10.22389/0016-7126-2018-938-8-60-64)

Yanchuk M.S. 2020. Chemical composition and current state of snow cover and ice on the south-west coast of Lake Baikal (on the example of the Goloustnensky Settlement) *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o zemle [The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences]* 32: 128-139. DOI: [10.26516/2073-3402.2020.32.128](https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.32.128) (in Russian)

Yearbook of the state of air pollution in cities of Russia for 2023. 2024. St. Petersburg. Federal State Budgetary Institution "GGO" (in Russian)

Особенности химического состава снежного покрова в районе Северного Байкала

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Чебунина Н.С.^{ORCID}, Луцкий Е.С.^{ORCID}, Сакирко М.В.^{ORCID}, Нецветаева О.Г.^{ORCID}

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

АННОТАЦИЯ. Представлены результаты исследования химического состава снежного покрова в районе Северного Байкала в 2023 г. Оценено пространственное распределение основных химических компонентов в снежном покрове. Особенностью ионного состава снеговых вод в сравнении с промышленными районами является высокое относительное содержание нитратов и ионов водорода. Рассчитано накопление главных ионов и биогенных компонентов в снежном покрове. Проведен сравнительный анализ полученных экспериментальных данных с региональными фоновыми значениями и результатами аналогичных исследований в прошлые годы. Отмечена тенденция к снижению минерализации и увеличению кислотности снеговых вод за последние 11 лет. Низкие значения суммы ионов и величины рН в снежном покрове в отдельных районах Северного Байкала позволяют отнести их к фоновым территориям для всего Байкальского региона.

Ключевые слова: снежный покров, химический состав, рН, главные ионы, биогенные компоненты, Северный Байкал

Для цитирования: Чебунина Н.С., Луцкий Е.С., Сакирко М.В., Нецветаева О.Г. Особенности химического состава снежного покрова в районе Северного Байкала // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 6. - С. 1525-1545. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-6-1525

1. Введение

Использование снежного покрова в качестве объекта исследования для эколого-геохимической характеристики территорий с различной антропогенной нагрузкой в последнее время приобретает все большую актуальность (Wang et al., 2018; Thapa et al., 2020; Szumińska et al., 2021; Shen et al., 2023). Подобная тенденция обусловлена простотой и доступностью процесса пробоотбора снежного покрова, его высокой сорбционной способностью к накоплению загрязняющих веществ, поступающих из атмосферы в результате сухого и влажного выпадения, а также возможностью оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха в течение нескольких месяцев зимнего периода. Как известно, талые снеговые воды могут оказывать влияние на состояние почвенного покрова, вызывая изменение его кислотности, а также способствовать эвтрофикации водных объектов. Для Байкальского региона исследование химического состава атмосферных выпадений имеет особую значимость, поскольку на этой территории расположено уникальное озеро Байкал,

являющееся источником чистой питьевой воды мирового значения.

Первые работы по оценке химического состава атмосферных осадков Байкальского региона проведены в начале 1950-х гг. Вотинцевым К.К. (1954). С 1962 г. мониторинговые исследования велись на пяти станциях Иркутским управлением гидрометслужбы. В 1970-1980 гг. исследования касались изменений в химическом составе осадков в связи с увеличением общего загрязнения атмосферы от различных промышленных объектов (Вотинцев и Ходжер, 1981; Ходжер, 1983; Валикова и др., 1985). С начала 1990-х гг. в связи с запуском новых предприятий в регионе большое внимание уделялось кислотности атмосферных осадков (Оболкин и Ходжер, 1990; Ермакова, 1998; Урбанавичене и др., 1998).

За последние десятилетия в большей степени исследован снежный покров на территории Южного Прибайкалья. Определен изотопный и элементный состав снежного покрова в Иркутске, Листвянке, на побережье оз. Байкал (Чиждова и др., 2015; Чебыкин и др., 2018; Онищук и др., 2023). Проведена оценка

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: nchebun@lin.irk.ru (N.S. Chebunina)

Поступила: 25 ноября 2024; Принята: 20 декабря 2024; Опубликована online: 25 декабря 2024

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



уровня загрязнения снежного покрова озера Байкал нефтепродуктами (Белозерцева и др., 2018; Янчук, 2018), полициклическими ароматическими углеводородами (Маринайте, 2005; Афонина, 2024), полихлорированными бифенилами (Мамонтов и др., 2006; Никонова и Горшков, 2007). Определен макрокомпонентный состав снеговых вод в районе Южного Байкала (Сороковикова и др., 2004; Томберг и др., 2016; Воробьева и др., 2016; Парадина и др., 2016), на юго-западном побережье озера Байкал (Янчук, 2020). Исследовано влияние крупных промышленных центров юга Иркутской области и Республики Бурятия на загрязнение снежного покрова Прибайкалья (Obolkin et al., 2016; Molozhnikova et al., 2022). Атмосфера Южного Прибайкалья, как следует из ранее проведенных исследований, испытывает ощутимую антропогенную нагрузку. Так, выбросы в атмосферу от предприятий теплоэнергетики в Иркутской области в 2022 г. составили 270,4 тыс. т (Гос. Доклад..., 2023).

Для оценки степени техногенного воздействия на уникальную природную среду озера Байкал необходимо исследование химического состава снежного покрова не только в районах с развитой промышленностью, но и в непромышленных фоновых районах, экосистема которых особо чувствительна к любому негативному воздействию. Довольно подробно изучены атмосферные выпадения на территории Байкальского государственного природного заповедника, расположенного на юго-восточном побережье озера Байкал (Ермакова, 1998; Урбанавичене и др., 1998; Нецветаева и др., 2004; Моложникова и др., 2023). Геохимические характеристики снежного покрова в районе Северного Прибайкалья, испытывающего не столь значительное в сравнении с Южным Прибайкальем влияние хозяйственной деятельности человека, изучены в меньшей степени (Ходжер, 1987; Белозерцева и др., 2018; Netsvetaeva et al., 2020; Белозерцева и др., 2023).

Северное Прибайкалье расположено на территории Иркутской области и Республики Бурятия. Климат Северного Прибайкалья резко континентальный. По данным метеостанции Нижнеангарск, средняя годовая сумма осадков составляет около 353 мм. Наибольшее количество осадков за исследуемый зимний период 2022-2023 гг. выпало в январе (35 мм). Февраль являлся самым малоснежным месяцем (6 мм). Преобладающее направление ветра - северо-западное (Летопись..., 2022; Погода..., 2022). Наиболее крупными населенными пунктами в районе исследования являются г. Северобайкальск и пос. Нижнеангарск с населением около 23 и 15 тыс. человек соответственно (Всероссийская перепись..., 2020). К основным стационарным источникам загрязнения атмосферного воздуха г. Северобайкальск относятся предприятия теплоэнергетики и промышленности, автомобильный и железнодорожный транспорт и др. Суммарные выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников г. Северобайкальска в 2023 г. составили 3,9 тыс. т. (Гос. доклад..., 2024).

Настоящая работа посвящена исследованию особенностей химического состава снежного покрова на Северном Байкале и оценке уровней накопления основных ионов и биогенных компонентов в снежном покрове в современный период.

2. Материалы и методы

Для оценки экологического состояния атмосферы в районе Северного Байкала и количества загрязняющих веществ, поступающих на подстилающую поверхность за холодный период 2022-2023 гг. (ноябрь-март), в период максимального снегонакопления в Байкальском регионе, проведены снегомерные съемки Устойчивый снежный покров на этой территории сформировался в середине ноября 2022 г. Снегомерные съемки выполнены нами 8-12 марта 2023 г. Отбор проб в районе Северного Байкала осуществлялся в бассейне притоков северного и северо-западного побережий Байкала на площадках (станциях) - (рр. Верхняя Ангара (станции 23, 24), Кичера (станция 21), Холодная (станция 22), Тья (станция 14)), в г. Северобайкальске (станция 13), со льда озера в районе Кичерской прорвы (станция 19, 20), в таежной зоне вдоль автотрасс «25Н-152 Магистральный – Окунайский», 25К-258 «Усть-Кут – Северобайкальск» (станции 1-11) (далее автодорога Жигалово-Северобайкальск). Для исключения влияния дорожной пыли и выхлопных газов автотранспорта отбор произведен на расстоянии 100–200 м от автодорог. Кроме того, 20-28 февраля 2023 г. снег отобран в других районах Байкальского региона, где отсутствуют крупные промышленные предприятия - на юго-западном побережье озера Байкал в пос. Листвянка (станции 26, 27), на юго-восточном побережье озера (в бассейне рек Снежная, Переменная, Хара-Мурин, Солзан, Утулик – станции 36-41)) и в лесном массиве вдоль трассы «25Н-209 Иркутск – Листвянка» (станции 28-35) (Рис. 1).

Для сравнения полученных материалов использовались данные по химическому составу снежного покрова, отобранного в 2012, 2015, 2020 гг. в районе Северного Байкала на тех же станциях, а также данные снегосъемок 2022 г. в промышленных центрах Байкальского региона (гг. Иркутск, Шелехов, Ангарск, Улан-Удэ) (Molozhnikova et al., 2023). Данные по количеству отобранных проб и высоте снежного покрова представлены в Таблице 1.

Всего на исследуемой территории в 2023 г. отобрано 66 проб снежного покрова (Таблица 1), за период с 2012 по 2020 гг. на Северном Байкале - около 100 проб. Отбор кернов снежного покрова проведен на полную глубину его залегания, исключая захват частиц грунта с использованием градуированной пластиковой трубы диаметром 11 см. На льду озера, где высота снежного покрова невысока, пробы отбиралась с определенной площади с помощью пластикового совка. Влагозапас в снежном покрове определялся как отношение объема растопленной пробы к площади, с которой отбирался снег (Василенко и др., 1985). Определение химического состава снеговой воды выполнялось с

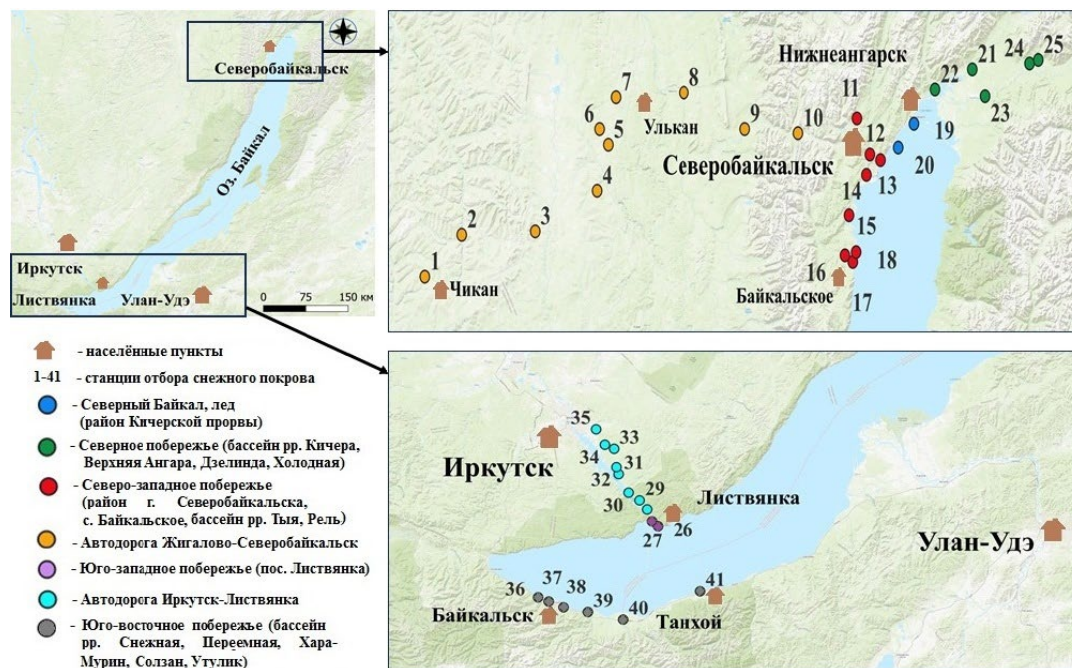


Рис.1. Карта отбора проб снежного покрова в Байкальском регионе в 2023 г.

использованием общепринятых гидрохимических методик (Khodzher et al., 2016; Аналитические..., 2017) в аккредитованной лаборатории гидрохимии и химии атмосферы и Центра коллективного пользования Лимнологического института Сибирского отделения Российской академии наук (г. Иркутск). Концентрации катионов металлов определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (спектрометр атомно-абсорбционный соntrAA 800, Германия), анионов – ионной хроматографией (ионный хроматограф ICS – 3000, Dionex, США), биогенных элементов – фотоколориметрическим методом (фотометр фотоэлектрический КФК-3-01-«ЗОМЗ», Россия; СПЕКС ССП-705М, Россия), рН – потенциометрическим методом (рН-метр «Эксперт-рН», Россия).

3. Результаты и их обсуждение

3.1. Величина рН в снеговой воде в районе Северного Байкала

Расплавы снежного покрова на побережье Северного Байкала в зимний период 2022/23 г. имели слабокислую реакцию среды. Величина рН изменялась в диапазоне 4,7-6,1, составляя в среднем 5,3 ед. рН (Рис. 2). Минимальные значения зафиксированы на побережье р. Кичера (станция 21), максимальные - на побережье р. Тья вблизи г. Северобайкальск (станция 14). В самом городе величина рН достигала значений 7,2 ед. рН, что, вероятно, обусловлено воздействием выбросов ТЭЦ и местных котельных (щелочных компонентов золы сгоревшего топлива).

В межгодовой динамике отмечено постепенное уменьшение величины рН в снеговых водах за годы исследования (Рис. 2). При этом величина отношения эквивалентных концентраций основных ионов, определяющих кислотность осадков

Таблица 1. Район исследования и количество точек отбора снежного покрова в Байкальском регионе в 2023 г.

Район исследования	Количество проб	Высота снежного покрова, см
Северный Байкал, лед	6	15-35 (26)
Северное побережье	5	65-94 (79)
Северо-западное побережье	9	18-48 (32)
Автодорога Жигалово-Северобайкальск	12	33-147 (64)
Юго-западное побережье (пос. Листвянка)	11	1-52 (35)
Автодорога Иркутск – Листвянка	8	30-60 (47)
Юго-восточное побережье	15	47-83 (65)

Примечание: в скобках - среднее значение.

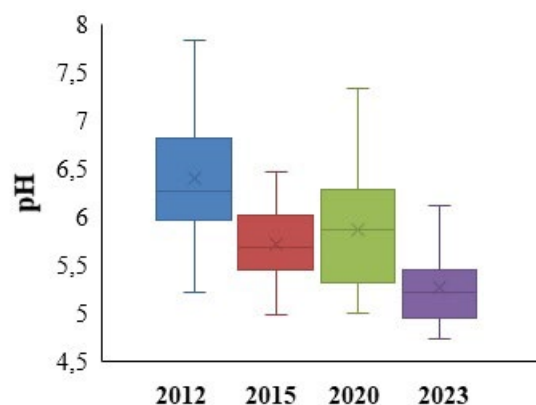


Рис.2. Величина рН в снеговой воде в районе Северного Байкала в марте 2012, 2015, 2020, 2023 гг.

$[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]/[SO_4^{2-}] + [NO_3^-]$, с 2012 г. по 2023 г. снизилась с 1,5 до 0,9. Значение данного отношения меньше 1, что свидетельствует о неполной нейтрализации кислотности анионов сильных кислот в снеговой воде. Это произошло вследствие более значительного уменьшения концентраций кальция (в 4,6 раза) по сравнению с содержанием нитратов и сульфатов (в 1,6-3,6 раза) за рассматриваемый период. Среднее же отношение содержания главных нейтрализующих катионов ($K = [NH_4^+] + [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Na^+] + [K^+]$) к содержанию анионов ($A = [SO_4^{2-}] + [NO_3^-] + [Cl^-]$) K/A равно 1, что наряду с низкой минерализацией свидетельствует о том, что в настоящий период система еще находится в состоянии равновесия, т.е. закисление снежного покрова на побережье Северного Байкала в настоящее время не происходит (Комов и Лазарева, 1994; Василевич и др., 2011) (Таблица 2). Хотя следует отметить, что с 2012 г. по 2023 г. наметился тренд постепенного снижения данного отношения с 1,6 до 1,0.

Среднее значение величины pH за рассматриваемый 4-х летний период наблюдений составило 5,9, что характерно для незагрязненных атмосферных осадков. Полученные величины pH сопоставимы с соответствующими средними значениями для осадков на 10 фоновых российских станциях, входящих в систему Глобальной службы атмосферы Всемирной метеорологической организации (ВМО) за 2023 г., для которых этот показатель находился в пределах 5,5-6,5 (Першина и др., 2024). Средняя величина pH в снежном покрове на побережье Северного Байкала (5,3) в 2023 г. сравнима с таковыми на юго-западном и юго-восточном побережьях озера, не подверженных непосредственному воздействию выбросов крупных промышленных предприятий (5,0-5,3). Однако она выше величин pH, характерных для снежного покрова арктических районов (4,97) и фонового района оз. Байкал - Байкало-Ленского заповедника (4,96) (Netsvetaeva et al., 2020; Шевцова и др., 2022). В таежной зоне в районе автодороги Жигалово-Северобайкальск среднее значение pH было выше (5,8) и изменялось в пределах 4,9-7,3.

3.2. Главные ионы в снеговой воде Северного Байкала

Распределение главных ионов в снежном покрове на побережье Северного Байкала выглядит следующим образом: $Ca^{2+} > NO_3^- > SO_4^{2-} > H^+ > Mg^{2+} > HCO_3^- > Cl^- > Na^+ > K^+ > NH_4^+$ (Рис. 3).

Химический состав снежного покрова в районе побережья Северного Байкала и в промышленных центрах Байкальского региона существенно различается по относительному содержанию основных катионов и анионов. В катионном составе снеговой воды побережья Северного Байкала преобладают ионы кальция (30%-экв.) и водорода (12%-экв.), в анионном составе - нитраты (19%-экв.) и сульфаты (17%-экв.). О ведущей роли нитратов среди анионов свидетельствует и отношение эквивалентных концентраций $[SO_4^{2-}]/[NO_3^-] = 0,8$ (Таблица 2). Доминирование нитратов над сульфатами отмечено также на юго-восточном побережье Байкала, где относительное содержание нитратов составило 20%-экв., при этом отношение $[SO_4^{2-}]/[NO_3^-]$ составило 0,7. Такое распределение анионов характерно для незагрязненных фоновых районов и объясняется дальним переносом оксидов азота (Obolkin et al., 2016; Sicard et al., 2023). В снежном покрове промышленных городов Прибайкалья в 2022 г. преобладали сульфаты, фториды, гидрокарбонаты среди анионов и кальций, магний, натрий среди катионов (Рис. 3). Подобное соотношение основных ионов, как правило, характерно для снежного покрова крупных промышленных центров, где существенно влияние предприятий топливно-энергетического комплекса и промышленности (Новороцкая, 2018; Гладун и др., 2024). Так, в г. Улан-Удэ относительное содержание сульфатов достигало 18-23%-экв., в то время как содержание нитратов не превышало 5-9%-экв.

Для снежного покрова побережья Северного Байкала отмечена высокая степень корреляции ($r = 0,7-1,0$) между следующими парами ионов: $SO_4^{2-}-Ca^{2+}$, $HCO_3^- -Mg^{2+}$, $HCO_3^- -Ca^{2+}$, $SO_4^{2-}-Mg^{2+}$, $HCO_3^- -NH_4^+$, что указывает на общие источники их поступления, преимущественно терригенного происхождения (Рис. 4).

На Рис. 5а представлена схематическая карта распределения главных ионов в снежном покрове Северного Байкала в 2023 г., созданная на базе пакета Q GIS. Размер каждой отдельной картодиаграммы соответствует определенной величине суммы ионов, рассчитанной для каждой станции отбора проб снежного покрова. Данные картодиаграммы позволяют одновременно отображать содержание всех ионов, а также выявить наиболее загрязненные районы. Для сравнения полученных результатов аналогичная карта-схема пространственного распределения главных ионов построена для Южного Прибайкалья (Рис. 5б).

Таблица 2. Соотношения эквивалентных концентраций главных ионов в снеговой воде Северного Байкала в 2023 г.

Показатель	Побережье Северного Байкала	Автодорога Жигалово- Северобайкальск
$[SO_4^{2-}]/[NO_3^-]$	0,8	0,8
$[NH_4^+] + [Ca^{2+}] + [Mg^{2+}] + [Na^+] + [K^+]/[SO_4^{2-}] + [NO_3^-] + [Cl^-]$	1,0	2,8
$[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]/[SO_4^{2-}] + [NO_3^-]$	0,9	3,0

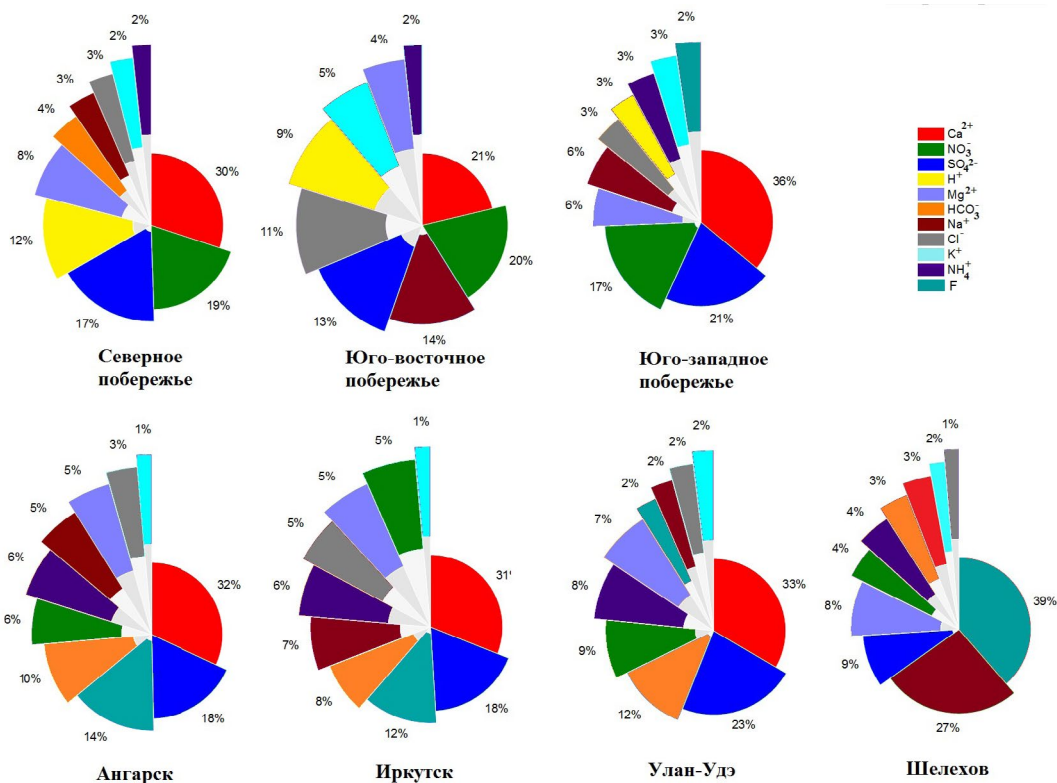


Рис.3. Среднее относительное содержание ионов (%-экв) в снежном покрове Байкальского региона в 2022-2023 гг.

В районе побережья Северного Байкала суммарное содержание ионов (Σ_i) в снеговой воде изменялось в пределах 1,2-6,9 мг/л и в среднем составило 2,7 мг/л. Эти значения сопоставимы с минимальными величинами на юго-восточном побережье озера – в бассейне рек Снежная и Харамурин (станции 37 и 38 соответственно) (Рис 5а, б), а также с региональными фоновыми значениями на территории Байкало-Ленского заповедника (3 мг/л) (Netsvetaeva et al., 2020). В сравнении с крупными промышленными центрами Южного Прибайкалья этот показатель в 8-20 раз ниже (Molozhnikova et al., 2023).

Как видно из Рис. 5а, наибольшее суммарное содержание ионов зарегистрировано в снежном покрове на станции 13 (г. Северобайкальск) – до 31 мг/л, что обусловлено влиянием антропогенных источников загрязнения воздуха в городе. Минимальные значения фиксировались в пробах, отобранных со льда Байкала в районе Кичерской прорвы – 1,2 мг/л (станция 20), а также в бассейне рек Кичера, Верхняя Ангара и Дзелинда – до 2,6 мг/л (станции 21, 23, 24 и 25 соответственно). Следует отметить, что величины pH на этих станциях также были невысоки (в среднем 5,2 ед. pH). Низкие значения pH и Σ_i в снежном покрове обусловлены относительной удаленностью данных территорий от источников антропогенного загрязнения. В снежном покрове таежной зоны в районе автотрассы Жигалово-Северобайкальск сумма ионов изменялась в широких пределах, от 1,1 до 17,1 мг/л (среднее - 4,1 мг/л). Максимум Σ_i отмечен в 105 км от р.п. Жигалово (станция 2) и обусловлен повышенной запыленностью воздуха в данной точке отбора. Низкие значения Σ_i регистрирова-

лись на границе Иркутской области и Республики Бурятия, где высота снежного покрова была максимальной (станция 10). В сравнении с данными снегомерных съемок, проведенных ранее, Σ_i в районе побережья Северного Байкала снизилась в 2-5 раз (Рис. 6). Станции 10, 20, 21, 23, 24 и 25 по содержанию главных ионов и величине pH нами выделены как фоновые для Северного Байкала и всего Байкальского региона в целом.

В Таблице 3 представлено среднее содержание основных ионов в снежном покрове побережья Северного Байкала за 4-летний период наблюдений (2012, 2015, 2020, 2023 гг.). Концентрации большинства ионов существенно варьировали в зависимости от типа местности и близости к промышленным зонам и транспортным магистралям.

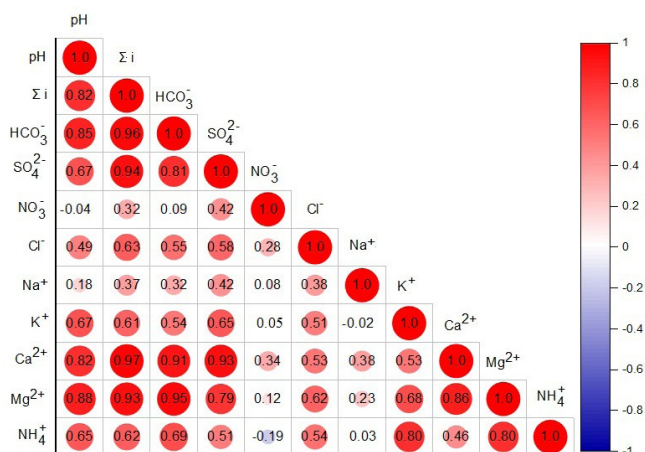


Рис.4. Коэффициенты корреляции Пирсона между содержанием ионов в снежном покрове на побережье Северного Байкала в 2023 г.

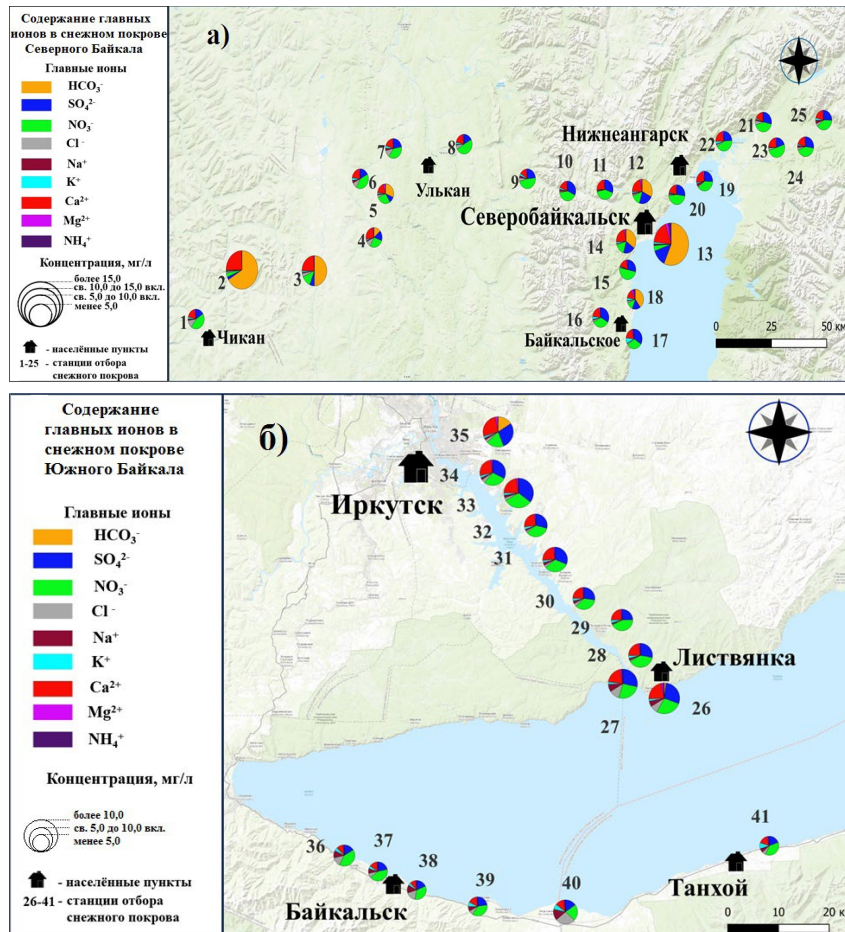


Рис.5. Схематическая карта распределения содержания главных ионов в снежном покрове Байкальского региона в 2023 г. (а - Северный Байкал; б - Южный Байкал).

Среднее содержание главных ионов в снежном покрове на Северном Байкале в 2023 г. снизилось в сравнении с 2012 г. от 2 до 13 раз (Таблица 3). Подобная тенденция прослеживается и в других районах России. Так, за период 2019–2023 гг. в городах России в основном произошло уменьшение средних значений концентраций основных загрязняющих веществ в воздухе и количества выбросов от стационарных источников и автотранспорта. Суммарные выбросы диоксида серы от стационарных и передвижных источников снизились на 11 %; оксидов азота – на 2% (Ежегодник состояния..., 2024).

3.3. Биогенные компоненты в снеговой воде Северного Байкала

Минеральный и общий азот. Среднее содержание минерального азота в снежном покрове на Северном Байкале составило 0,22 мг/л, изменяясь от 0,13 до 0,28 мг/л. Содержание общего азота в разных районах исследуемой территории было выше от 1,8 до 2,2 раз. Максимальное содержание $N_{\text{мин}}$ и $N_{\text{общ}}$ зафиксировано в окрестностях Северобайкальска (станция 12). Вне зоны антропогенного влияния большая часть азота представлена его минеральными формами (56-60%). В районах с повышенной антропогенной нагрузкой (окрестности г. Северобайкальска, побережье в устье р. Тья,

с. Байкальское, 105 км северной трассы) в 2023 г. до 77% азота находилось в органической форме. Расчет соотношения разных форм минерального азота в снеговой воде показал преобладание нитратного азота над аммонийным азотом.

В отличие от других ионов концентрации нитратного азота распределены в снежном покрове в районе Северного Байкала равномерно. В среднем содержание данного компонента в 2023 г. составило 0,19 мг/л, что в 2-5 раз ниже аналогичных значений в других районах Байкальского региона. Незначительная вариация концентраций нитратного азота (в среднем 26%) в сравнении с другими ионами свидетельствует о преобладании трансграничной и региональной фоновой составляющих над влиянием локальных источников (Таблица 3). В чистых районах доля нитратного азота составляет 96-97 % от его общего содержания, в окрестностях г. Северобайкальска снижается до 77 %. В самом Северобайкальске отмечено доминирование аммонийного азота (до 70%). Это свидетельствует об его антропогенном происхождении.

Минеральный и общий фосфор. Содержание минерального фосфора в снежном покрове Северного Байкала варьировало в пределах 0,3-33 мкг/л, общего фосфора - 3-61 мкг/л. Максимумы средних значений данных компонентов (14 и 33 мкг/л соответственно) наблюдались на северо-западном побережье в районе г. Северобайкальска и

Таблица 3. Среднее содержание основных ионов (в мг/л) в снежном покрове в районе Северного Байкала в 2012, 2015, 2020, 2023 гг.

Район исследования	Период	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺
Северный Байкал, лед	2012	3,6	2,33	1,64	0,17	0,21	0,08	1,80	0,28	0,05
	2015	0,8	0,57	0,69	0,09	0,08	0,03	0,53	0,09	0,01
	2020	3,5	1,31	1,75	0,11	0,36	0,12	1,34	0,35	0,05
	2023	0	0,47	0,80	0,03	0,05	0,03	0,32	0,05	0,03
	μ	2,0	1,17	1,22	0,10	0,18	0,07	1,00	0,19	0,04
	Σ	1,8	0,86	0,55	0,06	0,14	0,04	0,69	0,15	0,02
	CV, %	94	73	45	58	81	67	69	75	55
Северное побережье	2012	0,4	0,64	1,06	0,21	0,1	0,11	0,49	0,07	0,11
	2015	0,1	0,67	0,78	0,08	0,06	0,05	0,33	0,06	0,11
	2020	0,3	0,53	1,03	0,07	0,03	0,12	0,70	0,08	0,05
	2023	0	0,54	0,91	0,10	0,05	0,06	0,40	0,06	0,01
	μ	0,2	0,60	0,95	0,12	0,06	0,09	0,48	0,07	0,07
	Σ	0,2	0,07	0,13	0,06	0,03	0,04	0,16	0,01	0,05
	CV, %	91	12	14	56	49	41	33	14	70
Северо-западное побережье	2012	11	4,42	1,55	0,16	0,14	0,24	4,51	0,49	0,29
	2015	3,4	1,79	0,88	0,17	0,10	0,56	1,03	0,23	0,34
	2020	1,7	1,41	1,18	0,10	0,06	0,37	1,19	0,22	0,26
	2023	1,1	0,96	0,84	0,09	0,05	0,14	0,79	0,13	0,07
	μ	4,3	2,15	1,11	0,13	0,09	0,33	1,88	0,27	0,24
	Σ	4,6	1,55	0,33	0,04	0,04	0,18	1,76	0,16	0,12
	CV, %	106	72	30	31	47	55	94	58	49
Автодорога Жигалово-Северобайкальск	2012	1,4	0,47	1,00	0,09	0,07	0,10	0,59	0,09	0,09
	2015	1,9	0,59	0,72	0,16	0,08	0,13	0,76	0,10	0,12
	2020	2,6	0,65	0,84	0,10	0,06	0,10	1,10	0,13	0,03
	2023	1,8	0,44	0,83	0,19	0,07	0,07	1,01	0,07	0,02
	μ	1,9	0,54	0,85	0,14	0,07	0,10	0,87	0,10	0,07
	Σ	0,5	0,10	0,12	0,05	0,01	0,02	0,23	0,03	0,05
	CV, %	26	18	14	36	12	24	27	26	74

Примечание: μ - среднее значение; Σ - стандартное отклонение; CV - коэффициент вариации, %.

с. Байкальское. Важно отметить, что полученные величины на данном участке довольно высокие, что вероятно, обусловлено повышенным природным фоном, наличием соединений фосфора в почве (Белозерцева и др., 2023), а также антропогенным загрязнением.

3.4. Накопление загрязняющих веществ в снежном покрове Северного Байкала

Поступление загрязняющих веществ на подстилающую поверхность в районе Северного Байкала определялось по результатам химического анализа проб снежного покрова, сформированного за зимний период (с ноября по февраль-март) (Таблица 4). Как известно, величина накопления химических компонентов в снежном покрове зависит от влагозапаса в снеге и концентраций определяемых компонентов.

Суммарное накопление ионов служит характеристикой общего загрязнения снежного покрова. На Северном Байкале эта величина за 4 года наблюдений изменялась в среднем в пределах 230-440 мг/м². В 2023 г. наибольшие величины аккумуляции Σ_и определены в таежной зоне автотрассы Жигалово-Северобайкальск, что обусловлено большим влагозапасом в снеге на отдельных участках этого маршрута (до 135 мм). Минимум накопления в 2023 г. зарегистрирован на льду озера, где влагозапас был около 50 мм. Кроме того, период накопления исследуемых компонентов в снежном покрове на льду озера был в два раза меньше, чем на побережье. Для корректного сравнения величин накопления на льду и побережье рассчитанные данные по аккумуляции на акватории озера были увеличены вдвое (Таблица 4). Сравнение показало, что аккумуляция Σ_и в снежном покрове Северного Байкала в 2 раза ниже, чем на Южном Байкале и в 2-6 раз ниже, чем

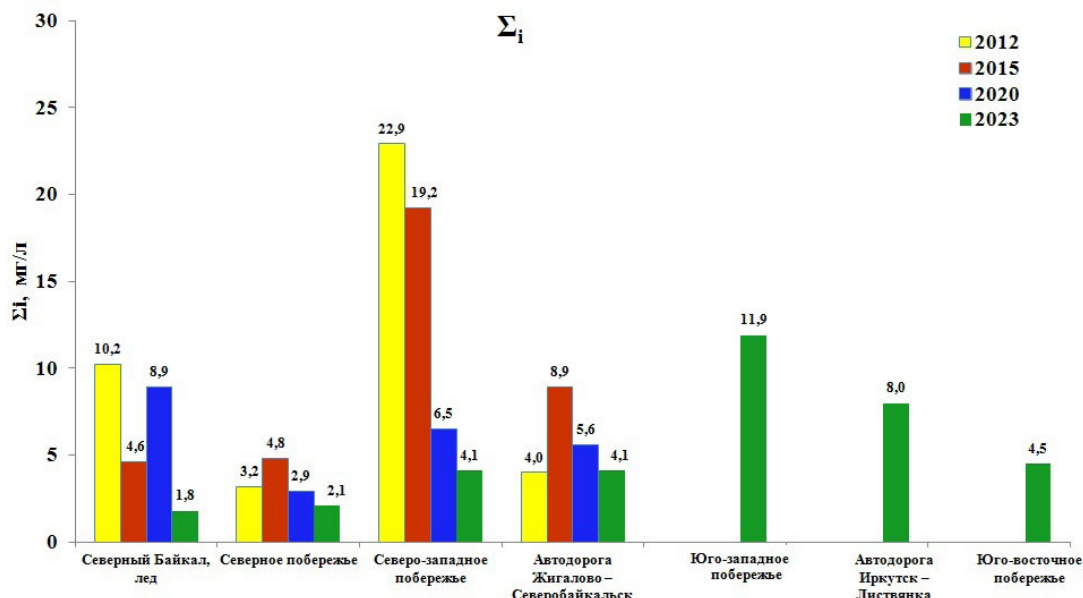


Рис.6. Средние суммы ионов (в мг/л) в снежном покрове Байкальского региона за 4-х летний период наблюдений.

в промышленных центрах Южного Прибайкалья (Таблица 4).

Накопление **кальция** (основного щелочного компонента) в снежном покрове Северного Байкала за исследуемый период изменялось в среднем от 40 до 70 мг/м². В 2023 г. это значение было в 1,3 и 2,3 раза соответственно ниже, чем на юго-восточном и юго-западном побережьях Байкала. В сравнении с промышленными центрами Байкальского региона (за исключением г. Шелехов) эта величина ниже в 2-6 раз.

Наиболее значимо для непромышленных «чистых» районов накопление кислотных компонентов в снежном покрове – **сульфатной серы** (S(SO₄²⁻), **минерального азота** (ΣN_{мин} = N(NO₃⁻) + N(NH₄⁺)

и **ионов водорода** (H⁺). Сумма накопления минерального азота на Северном Байкале за годы исследований составила 16-27 мг/м². В 2023 г. наиболее высокие значения зафиксированы на льду р. Умбелла (станция 8) и в районе пос. Кунерма (станция 9), где влагозапас был максимальным (190-215 мм). Минимальные значения аккумуляции азота (меньше 10 мг/м²) определены на северо-западном побережье и на льду оз. Байкал, где влагозапас в 7 раз меньше. В сравнении с Южным Байкалом аккумуляция N_{мин} в 3 раза ниже.

Величина накопления **сульфатной серы** в снежном покрове на Северном Байкале в исследуемые годы находилась в пределах 14–25 мг/м², минимальные значения зафиксированы в 2023 г. Анализ

Таблица 4. Накопление химических компонентов (мг/м²) и влагозапас (мм) в снежном покрове Байкальского региона, 2022-2023 гг.

Район исследования	HCO ₃ ⁻	S(SO ₄ ²⁻)	N _{мин}	Ca ²⁺	H ⁺	P _{мин}	Σ _и	Влагозапас, мм
Северный Байкал, лед	0	12-20 14	12-22 18	22-38 30	0.6-1.4 1.0	0.02-0.2 0.1	124-214 164	32-55 47
Северное побережье	0	10-27 19	11-28 22	22-54 42	0.3-2.0 0.9	0.04-0.8 0.3	117-291 225	72-150 106
Северо-западное побережье	0-108 45	8-25 14	7-14 11	14-70 35	0.03-1.0 0.3	0.2-1.6 0.7	76-335 180	29-59 44
Автодорога Жигалово-Северобайкальск	0-1522 192	7-24 14	8-41 20	16-563 101	0.01-2.8 0.7	0.06-1.6 0.7	92-2288 460	46-215 108
Южный Байкал	0-170 6	1-120 50	10-105 50	3-285 115	0-4.2 0.9	0-1.3 0.2	280-1270 610	1-190 100
Шелехов*	33-350 92	20-160 60	20-235 50	1-190 40	0-0.04 0.02	0.03-1.6 0.2	260-2130 820	20-50 35
Иркутск*	5-1055 130	15-135 66	8-66 36	25-420 150	0-0.38 0.04	0.02-3.6 0.4	175-2035 680	20-62 33
Ангарск*	7-8100 630	17-850 105	20-60 32	35-3135 320	0-0.07 0.02	0-1.8 0.2	190-14900 1460	12-45 27
Улан-Удэ*	0-320 120	25-340 60	15-70 35	40-190 110	0-0.09 0.02	0.2-2.6 0.7	200-2280 540	11-36 20

Примечание: *- данные за 2022 г.

полученных данных показал, что в снежном покрове Северного Байкала в среднем накапливается от 3 до 7 раз меньше серы, чем на южном побережье озера и в промышленных городах Байкальского региона соответственно.

Как следует из Таблицы 3, накопление H^+ в снежном покрове Северного Байкала в среднем в 1,2 раза меньше, чем на Южном Байкале. Это связано как с меньшим влагозапасом в снеге на севере озера, так и более высокими величинами рН в снеговой воде.

Накопление $\text{P}_{\text{мин}}$ в снежном покрове отдельных районов на северо-западном побережье озера Байкал и в таежной зоне вдоль северной автотрассы довольно высоко: сопоставимо с аналогичной величиной в г. Улан-Удэ и в 2-4 раза выше, чем в промышленных центрах Южного Прибайкалья.

4. Заключение

В настоящий период снежный покров Северного Байкала характеризуются низкой минерализацией, доминированием нитратов в анионном составе. В межгодовой динамике отмечено постепенное уменьшение суммы ионов и величины рН в снеговых водах за годы исследования. Нитратный азот являлся преобладающей формой минерального азота в снеговой воде. Концентрации большинства компонентов химического состава ниже, чем на юго-западном побережье озера, сопоставимы с региональными фоновыми значениями. В снежном покрове отдельных районов Северного Байкала содержание минерального фосфора довольно высоко вследствие повышенного природного фона и антропогенного загрязнения.

Аккумуляция суммы ионов, кальция, сульфатной серы и минерального азота в снежном покрове Северного Байкала в 2-3 раза ниже, чем на Южном Байкале и в 2-7 раз ниже, чем в промышленных центрах Южного Прибайкалья. Накопление минерального фосфора в отдельных районах Северного Байкала сопоставимо с соответствующей величиной в г. Улан-Удэ и в 2-4 раза выше, чем в промышленных центрах Южного Прибайкалья.

Выявлены территории, которые по содержанию главных ионов и величине рН в снежном покрове могут являться фоновыми для Северного Байкала и всего Байкальского региона. Низкое содержание суммы ионов и величины рН обусловлены относительной удаленностью данных территорий от крупных источников антропогенного загрязнения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ЛИН СО РАН по теме 0279-2021-0014 «Исследование роли атмосферных выпадений на водные и наземные экосистемы бассейна озера Байкал, идентификация источников загрязнения атмосферы».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Khodzher T.V., Domysheva V.M., Sorokovikova L.M. et al. 2016. Part II. Method and case studies for understanding and monitoring the landscapes of Siberia. Chapter 3. Methods for monitoring the chemical composition of Baikal water. In: Mueller L. et al. (Ed.), *Novel Methods for Monitoring and Managing Land and Water Resources in Siberia*. Cham, pp. 113-132. DOI: [10.1007/978-3-319-24409-9_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24409-9_3)
- Molozhnikova Y.V., Shikhovtsev M.Yu., Marinaite I.I. et al. 2022. Spatial distribution of anthropogenic tracers in the snow cover of the Southern Baikal region. *Proceedings of SPIE* 12341: 1-7. DOI: [10.1117/12.2644206](https://doi.org/10.1117/12.2644206)
- Molozhnikova Y.V., Shikhovtsev M.Y., Netsvetaeva O.G. et al. 2023. Ecological Zoning of the Baikal Basin Based on the Results of Chemical Analysis of the Composition of Atmospheric Precipitation Accumulated in the Snow Cover. *Applied Sciences* 13(8171): 1-17. DOI: [10.3390/app13148171](https://doi.org/10.3390/app13148171)
- Netsvetaeva O.G., Onishchuk N.A., Marinaite I.I. et al. 2020. Chemical composition of snow cover in specially protected, non-industrial, and industrial areas of the Baikal region. *Proc. SPIE* 11560, 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics 115603N. DOI: [10.1117/12.2575035](https://doi.org/10.1117/12.2575035)
- Obolkin V., Khodzher T., Sorokovikova L. et al. 2016. Effect of long-range transport of sulphur and nitrogen oxides from large coal power plants on acidification of river waters in the Baikal region, East Siberia. *International Journal of Environmental Studies* 73(3): 452-461.
- Shen J., Song Y., Cheng C. et al. 2023. Spectroscopic and compositional profiles of dissolved organic matters in urban snow from 2019 to 2021: Focusing on pollution features identification. *Water Research* 229 (119408): 1-9. DOI: [10.1016/j.watres.2022.119408](https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.119408)
- Sicard P., Agathokleous E., Anenberg S.C. et al. 2023. Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective. *Science of The Total Environment* 858 (160064): 1-13. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2022.160064](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160064)
- Szumińska D., Potapowicz J., Szopińska M. et al. 2021. Sources and composition of chemical pollution in Maritime Antarctica (King George Island). Part 2: Organic and inorganic chemicals in snow cover at the Warszawa Ice field. *Science of the Total Environment* 796 (149054): 1-13. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.149054](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149054)
- Thapa P., Xu J., Neupane B. et al. 2020. Chemical composition of inorganic and organic species in snow/ice in the glaciers of western China. *Science of the Total Environment* 135351: 1-9. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.135351](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135351)
- Wang Y., Bian J., Zhao Y. et al. 2018. Assessment of future climate change impacts on nonpoint source pollution in snowmelt period for a cold area using SWAT. *Scientific reports* 8: 2402. DOI: [10.1038/s41598-018-20818-y](https://doi.org/10.1038/s41598-018-20818-y)
- Аналитические, кинетические и расчетные методы в гидрохимической практике. 2017. В: Лазовик П.А., Ефременко Н.А. (Ред.). Санкт-Петербург: Нестор-История.
- Афони́на Т.Е. 2024. Полициклические ароматические углеводороды в снежном покрове Прибайкалья и бассейна озера Байкал. *Вестник Воронежского государственного университета, Серия: География. Геоэкология* 2: 114-119. DOI: [10.17308/geo/1609-0683/2024/2/114-119](https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2024/2/114-119)
- Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В. и др. 2018. Экологическое состояние побережья озера Байкал и его влияние на загрязнение озера. *Успехи современного естествознания* 11: 85-95.

- Белозерцева И.А., Воробьева И.Б., Власова Н.В. 2023. Загрязнение снега и почв северо-западного побережья озера Байкал. Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология 1: 76-92. DOI: [10.17308/geo/16090683/2023/1/76-92](https://doi.org/10.17308/geo/16090683/2023/1/76-92)
- Валикова В.И., Матвеев А.А., Чебаненко Б.Б. 1985. Поступление некоторых веществ с атмосферными осадками в регионе озера Байкал. Совершенствование регионального мониторинга состояния озера Байкал. Ленинград, С. 58-66.
- Василевич М.И., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. 2011. Химический состав снежного покрова на территории таежной зоны Республики Коми. Водные ресурсы 38 (4): 494-506.
- Василенко В.Н., Назаров И.М., Фридман Ш.Д. 1985. Мониторинг загрязнения снежного покрова. Ленинград: Гидрометеиздат.
- Воробьева И.Б., Власова Н.В., Гагарина О.В. и др. 2016. Современное состояние территории поселка Листвянка по данным анализа растительности, поверхностных вод и снежного покрова. География и природные ресурсы 6: 93-98. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2016-6\(93-98\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2016-6(93-98))
- Вотинцев К.К. 1954. Химический состав вод атмосферных осадков Прибайкалья. Доклады Академии наук 95 (5): 979-981.
- Вотинцев К.К., Ходжер Т.В. 1981. Химический состав атмосферных осадков в районе озера Байкал. География и природные ресурсы 4: 100-105.
- Всероссийская перепись населения 2020 года. Том 1. 2020. Численность и размещения населения, Федеральная служба государственной статистики (Росстат). URL: https://rosstat.gov.ru/vpn_popul (02 Октября 2024).
- Гладун И.В., Шелганова А.А., Майорова Л.П. 2024. Техногенное загрязнение снежного покрова на территории Хабаровского края в период с 2015 по 2022 г. Вестник евразийской науки 16(3): 1-14. URL: <https://esj.today/PDF/94NZVN324.pdf>
- Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Иркутской области в 2022 году». 2023. Министерство природных ресурсов и экологии Иркутской области. Иркутск.
- Государственный доклад «О состоянии и охране окружающей среды Республики Бурятия в 2023 году». 2024. Министерство природных ресурсов и экологии Республики Бурятия. Улан-Удэ.
- Ежегодник состояния загрязнения атмосферы в городах на территории России за 2023 г. 2024. Санкт-Петербург. ФГБУ «ГГО».
- Ермакова О.Д. 1998. Зависимость функционирования отдельных компонентов экосистем Байкальского заповедника от кислотности атмосферных выпадений. В: Проблемы экологического мониторинга. Материалы X Байкальской школы-семинара, С. 106-118.
- Комов В.Т., Лазарева В.И. 1994. Причины и последствия антропогенного закисления поверхностных вод северного региона на примере сравнительно-лимнологического исследования экосистем озер Дарвинского заповедника. Труды Института биологии внутренних вод РАН 70: 3-30.
- Мамонтов А.А., Тарасова Е.Н., Мамонтова Е.А. 2006. Стойкие органические вещества Прибайкалья (полихлорированные бифенилы и хлорорганические пестициды). Труды государственного природного заповедника «Байкало-Ленский» 4: 15-24.
- Маринайте И.И. 2005. Полициклические ароматические углеводороды в окружающей среде Прибайкалья. Диссертация на соискание ученой степени кандидата химических наук, Институт географии СО РАН, Россия.
- Моложникова Е.В., Голобокова Л.П., Маринайте И.И. и др. 2023. Химический состав атмосферных выпадений на территории Байкальского государственного природного заповедника (восточное побережье Южного Байкала). Метеорология и гидрология 4: 10-21. DOI: [10.52002/0130-2906-2023-4-10-21](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-4-10-21)
- Нецветаева О.Г., Ходжер Т.В., Голобокова Л.П. и др. 2004. Химический состав снежного покрова в заповедниках Прибайкалья. География и природные ресурсы 1: 66-72.
- Никонова А.А., Горшков А.Г. 2007. Современные уровни накопления полихлорированных бифенилов в объектах Байкальской природной территории. Химия в интересах устойчивого развития 15(3): 363-369.
- Новороцкая А.Г. 2018. О результатах химического мониторинга снежного покрова Хабаровска. Успехи современного естествознания 12(2): 374-379. DOI: [10.17513/use.37023](https://doi.org/10.17513/use.37023)
- Оболкин В.А., Ходжер Т.В. 1990. Годовое поступление из атмосферы сульфатов и минерального азота в регионе оз. Байкал. Метеорология и гидрология 7: 71-76.
- Онищук Н.А., Нецветаева О.Г., Моложникова Е.В. 2023. Межгодовая динамика химического состава снежного покрова в Прибайкалье. Метеорология и гидрология 4: 33-42. DOI: [10.52002/0130-2906-2023-4-33-42](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-4-33-42)
- Парадина Л.Ф., Хахураев О.А., Воднева Е.Н. и др. 2016. Снежный покров в оценке экологического состояния Южного Байкала до и после закрытия Байкальского целлюлозно-бумажного комбината. В: Аналитика Сибири и Дальнего Востока: X Всероссийская научная конференция с международным участием. Барнаул, С. 133.
- Першина Н.А., Павлова М.Т., Ефимова О.Н. и др. 2024. Ионный состав атмосферных осадков на российских станциях, входящих в систему Глобальной Службы Атмосферы ВМО. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2023 год. Москва. Росгидромет. С. 47-54.
- Погода в городе Северобайкальск. 2022. URL: <https://weatherarchive.ru/Temperature/Severobaikalsk/November-2022> (22 сентября 2024)
- Погода и климат. Летопись погоды в Нижнеангарске. Месячные и годовые суммы выпавших осадков в Нижнеангарске. 2022. URL: http://www.pogodaiklimat.ru/history/30433_2.htm (25 сентября 2024)
- Сорокикова Л.М., Нецветаева О.Г., Томберг И.В. и др. 2004. Влияние атмосферных осадков на химический состав речных вод Южного Байкала. Оптика атмосферы и океана 17 (5-6): 423-427.
- Томберг И.В., Сорокикова Л.М., Нецветаева О.Г. и др. 2016. Химический состав и тенденции закисления снеговых вод и вод притоков Южного Байкала. Оптика атмосферы и океана 29(6): 516-520. DOI: [10.15372/AOO20160612](https://doi.org/10.15372/AOO20160612)
- Урбанавичене И.Н., Урбанавичюс Г.П., Ходжер Т.В. 1998. Мониторинг загрязнения атмосферных осадков в Байкальском биосферном заповеднике. Проблемы экологического мониторинга. В: Материалы. X Байкальской школы-семинара. Байкальск. Ин-т экологической токсикологии. С. 181-187.
- Ходжер Т.В. 1983. Химический состав атмосферных осадков. Экология Южного Байкала. С. 44-50.
- Ходжер Т.В. 1987. Поступление веществ из атмосферы в районе Прибайкалья и их роль в химическом балансе оз. Байкал. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук, Ленинград, Россия.
- Чебыкин Е.П., Дамбинов Ю.А., Хахураев О.А. и др. 2018. Источники поступления химических элементов в снежный покров береговой зоны поселка Листвянка

(Озеро Байкал). География и природные ресурсы 3: 74-85. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2018-3\(74-85\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-3(74-85))

Чижова Ю.Н., Васильчук Д.Ю., Йошикава К. и др. 2015. Изотопный состав снежного покрова Байкальского региона. Лед и снег 55(3): 55-66. DOI: [10.15356/2076-6734-2015-3-55-66](https://doi.org/10.15356/2076-6734-2015-3-55-66)

Шевцова О.В., Добротина Е.Д., Гончарова А.Б. и др. 2022. Химические характеристики снежного покрова в высокоширотной Арктике (мыс Баранова, остров Большевик, архипелаг Северная Земля). Лёд и Снег 62 (4): 564-578. DOI: [10.31857/S2076673422040152](https://doi.org/10.31857/S2076673422040152)

Янчук М.С. 2018. Исследование распределения и оценка загрязнения снежного покрова озера Байкал нефтепродуктами. Геодезия и картография 8: 60-64. DOI: [10.22389/0016-7126-2018-938-8-60-64](https://doi.org/10.22389/0016-7126-2018-938-8-60-64)

Янчук М.С. 2020. Оценка состояния снега и льда на юго-западном побережье озера Байкал (на примере Голоустненского поселения и примыкающей акватории озера) по данным химического анализа талой воды. Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле 32: 128–139. DOI: [10.26516/2073-3402.2020.32.128](https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.32.128)