

Chemical composition of various fractions of atmospheric aerosol in Southern Baikal region in 2024

Original Article

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Golobokova L.P.*^{ORCID}, Khodzher T.V.^{ORCID}, Lopatina I.N.^{ORCID}, Marinaite I.I.^{ORCID},
Obolkin V.A.^{ORCID}, Onischuk N.A.^{ORCID}, Chebunina N.S.^{ORCID}

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

ABSTRACT. For the first time, comprehensive seasonal studies of the chemical composition of aerosol particles across size fractions of 0.8, 2.0, 5.0, and 10 μm were conducted at three atmospheric monitoring stations: in the industrial center of Southern Baikal region in Irkutsk and in the Central Ecological Zone of the western coast of Southern Baikal – at the Listvyanka and Bolshiye Koty stations. The research included analysis of particle morphology, size distribution, ionic and trace element composition, polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and soot content. Spatial and seasonal variations in atmospheric aerosol composition across the three stations were shown to result from combined anthropogenic and natural factors: industrial activity, meteorological conditions, forest fires, and transportation. Elevated concentrations of pollutants across various particle size fractions were detected during the arrival of air masses from northwestern and northern directions, regions characterized by the presence of industrial centers in Irkutsk Oblast and Krasnoyarsk Krai. The summer periods featured transport of impurities via air masses from the southern directions (Buryatia, Mongolia, Tuva and Kazakhstan).

Keywords: Baikal region, atmosphere, aerosol, ions, microelements, morphology of elements, organic pollutants

For citation: Golobokova L.P., Khodzher T.V., Lopatina I.N., Marinaite I.I., Obolkin V.A., Onischuk N.A., Chebunina N.S. Chemical composition of various fractions of atmospheric aerosol in Southern Baikal region in 2024 // *Limnology and Freshwater Biology*. 2025. - № 4. - P. 960-982. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-960

1. Introduction

Anthropogenic emissions of pollutants into the atmosphere represent the most challenging component of environmental pollution to control, impacting not only atmospheric air but also aquatic and terrestrial ecosystems. The primary criterion for establishing air quality assessment standards is the degree of influence of contained pollutants on human health and the environment (Anenberg et al., 2016; Yue and Gao, 2018; Ionel et al., 2018; Grennfelt et al., 2020). Aerosol particles in the atmosphere play a critical role in shaping weather conditions and climate processes at regional and global scales, necessitating rigorous monitoring of their physical parameters and chemical composition.

In a study dedicated to a modern review of environmental pollution from various sources in specific regions of the world, an analysis of pollutant transport at regional and intercontinental levels was conducted (Karagulian et al., 2015). It is known that atmospheric pollutants can be transported within the stratospheric layer of the atmosphere over significant distances from the emission source, reaching tens of thousands of kilo-

meters (Fiedler et al., 2009). Large particles are rapidly removed from the atmosphere through both dry and wet deposition. Fine particles have a longer lifespan and pose a greater risk to the environment and human health than large particles. This is especially relevant for background territories like Siberia, where sensitivity to large-scale emissions from forest fires, natural gas flaring, and associated petroleum gas is high (Khodzher et al., 2019; Manousakas et al., 2020).

Within the atmospheric influence zone of Lake Baikal, several cities in the Irkutsk region have high levels of air pollution due to emissions of gaseous and particulate matter from sources close to the lake. These emissions have a 10-100 percent probability of depositing pollutants on the waters of Lake Baikal. This poses an ecological risk to the unique ecosystem of the lake. The hazard of aerosols stems from changes in their composition and dispersion, as well as the sorption of organic substances and heavy metals onto individual particles, among other factors. The atmosphere of Southern Baikal is experiencing the highest anthropogenic load. It receives impurities from regional pollution sources, such as the Angara River Valley (50-100

*Corresponding author.

E-mail address: lg@lin.irk.ru (L.P. Golobokova)

Received: August 01, 2025; **Accepted:** August 19, 2025;

Available online: August 31, 2025

© Author(s) 2025. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



kilometers northwest of the lake), and major coastal settlements (Obolkin et al., 2016; 2021). These sources include emissions from industrial facilities, transportation, and other human activities that degrade air quality and may adversely impact the environment. The primary research objective is a comprehensive seasonal analysis of the chemical composition of aerosol particles in different size fractions across several areas of the Southern Baikal Region with varying levels of anthropogenic pressure. The study emphasizes the need for such atmospheric aerosol monitoring in order to assess regional environmental conditions and identify sources of pollution in detail.

2. Materials and methods

2.1. Monitoring stations, atmospheric aerosol sampling

Atmospheric aerosol was collected in different seasons (winter, spring, summer, autumn) in 2024 at the Listvyanka and Bolshiye Koty stations located in the Central Ecological Zone (CEZ) of Southern Baikal, as well as in Irkutsk, located in the Atmospheric Influence Zone (AIZ).

The urban Irkutsk station (52.14°N, 104.15°E) is on Angara River's left bank, 70 km from Lake Baikal, with sampling conducted at the Limnological Institute (SB RAS) in the city's south. Listvyanka (51.50°N, 104.53°E), a rural station, sits above its namesake village on a coastal hill of Baikal's southwestern shore at ~200 m elevation within the Institute of Solar-Terrestrial Physics' (SB RAS) Astrophysical Observatory. Both stations belong to EANET (East Asia Acid Deposition Monitoring Network; Golobokova et al., 2025a). Bolshiye Koty station (51.90°N, 105.07°E) operated from a Limnological Institute (SB RAS) research base near the coastal village, located 24 km from Listvyanka (Fig. 1). Prior aerosol studies here revealed background ion concentrations in Southern Baikal's atmosphere. With minimal external influence (no shore fires/vessels), total aerosol ion concentrations at this station match Lake Baikal's background levels ($\leq 1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$; Golobokova et al., 2021). Atmospheric aerosol at the stations was sampled using an IKS-10 impactor cascade (LLC "INTEK" Corporation, Yekaterinburg, Russia), operating at a volume flow rate of 10 l/min. This separates aerosol particles into fractions of 0.8 μm , 2.0 μm , 5.0 μm and 10 μm .

2.2. Determination of the chemical composition of the aerosol

Analytical work was carried out using the instrumentation of the Ultramicroanalysis Center for Collective Use at the Limnological Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, employing standardized techniques. For complete extraction of NH_4^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} ions, aerosol filters were subjected to ultrasonic bath treatment. The ionic composition of the aerosol was analyzed using the ICS-3000 ion chromatography system manufactured by Dionex Corporation

(Sunnyvale, California, USA). During the analysis, the Analytical Columns IonPac AS19 (2 mm diameter, 250 mm length) and IonPac CS12A (2 mm diameter, 250 mm length) were used. The eluent generation system allows for the analysis of anions and cations at trace concentration levels.

Concentrations of 27 trace elements (Li, Be, B, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, W, Pb, Th, U, Ag, Tl) were determined via ICP-MS (Agilent 7500 ce, Agilent Scientific Instruments, Santa Clara, CA, USA). Filter impurities were extracted with concentrated HNO_3 and H_2O_2 at 95°C in an ultrasonic bath. The detection limit for each element was defined as the minimum concentration at which the sample signal exceeded the background component by a factor of three, with a confidence level of 98% (Golobokova et al., 2025b).

Concentrations of twenty-one polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the aerosol phase were quantified via the internal standard method using phenanthrene- d_{10} , chrysene- d_{12} , and perylene- d_{12} as spiking additives. The following compounds were analyzed on an Agilent GC System 7890B/7000C GC/MS Triple Quad system (Santa Clara, CA, USA): naphthalene, 2-methylnaphthalene, 1-methylnaphthalene, acenaphthene, acenaphthylene, fluorene, phenanthrene, anthracene, fluoranthene, pyrene, retene, benz[a]anthracene, chrysene, benzo[b]fluoranthene, benzo[k]fluoranthene, benzo[e]pyrene, benzo[a]pyrene, perylene, dibenz[a,h]anthracene, indeno[1,2,3-cd]pyrene, and benzo[g,h,i]perylene (Gorshkov et al., 2021; Marinaite et al., 2023).

Total carbonaceous compounds (soot, black carbon) on aerosol filters were quantified by high-temperature combustion in an oxygen environment using a Vario TOC cube TOC/TN analyzer with IR detector (Elementar Analysensysteme GmbH, Germany). The standard deviation did not exceed 0.01, with potassium hydrogen phthalate serving as the calibration standard (Pogodaeva et al., 2020).

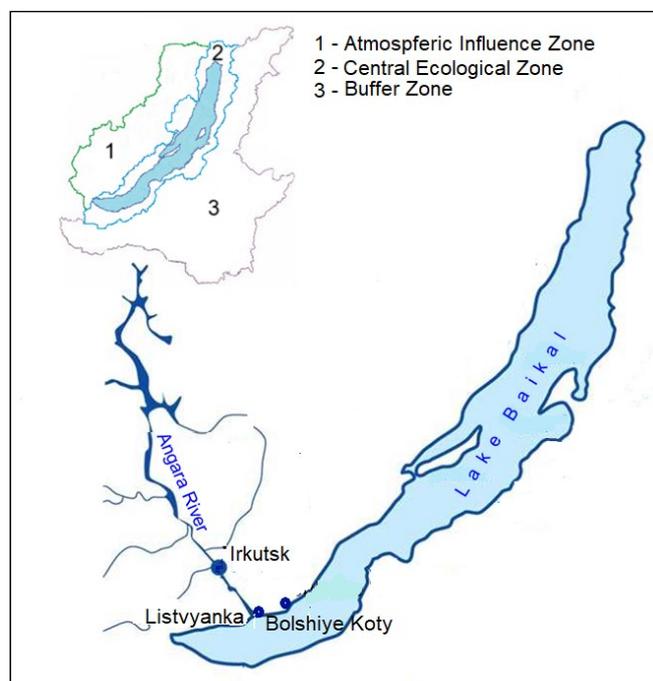


Fig.1. Scheme of atmospheric aerosol sampling stations.

Particle morphology and elemental composition were analyzed using an FEI Quanta 200 scanning electron microscope (FEI Company, Hillsboro, OR, USA) equipped with an EDAX energy-dispersive X-ray microanalysis system. To minimize electrical charging, particles were gold-coated using an automated Desktop Sputter and Carbon Coater DSCR vacuum system (Massachusetts, USA) (Belozerova et al., 2019).

To identify aerosol sources, backward air mass trajectory analysis was conducted for a three-day period at 500, 1000, and 1500-meter altitudes. Input data were provided by the U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration using the HYSPLIT model (ARL NOAA, <http://www.arl.noaa.gov>).

Enrichment factors (EF) for trace elements in aerosol particles were calculated as:

$$EF_i = [(C_i/Al)_{aer}] / [(C_i/Al)_{crust}] \quad (1),$$

where: EF_i – enrichment factor for element i , $(C_i/Al)_{aer}$ – ratio of element i to reference element (Al) in aerosols, $(C_i/Al)_{crust}$ – ratio of element i to (Al) in the Earth's crust (Rudnick and Gao, 2014).

The contribution of trace elements to total air pollution was calculated as (Order of the Ministry, 2022):

$$\text{Contribution, \%} = [(C_i/MPC_{daily})^{\beta_i} / \sum (C_i/MPC_{daily})^{\beta_i}] \times 100 \quad (2),$$

where: β_i – constant for different hazard classes,

C_i – concentration of trace element i in aerosol

MPC_{daily} – maximum permissible daily average concentration of element i in residential air.

3. Results and Discussion

3.1. Ionic composition of atmospheric aerosol

Atmospheric aerosol samples were collected at the Irkutsk station in February, March, June, July, October and December of 2021. This sampling strategy covers all seasons and captures diverse meteorological conditions typical of the study area. The seasonal variability of total ion concentration in atmospheric aerosols at Irkutsk follows patterns typical of urban areas: peak levels occur during autumn and winter months, mainly due to fuel and energy activities. Significant increases in concentration occur in October, coinciding with the start of the heating season, while increased values in December are caused by unstable snow cover

and increased anthropogenic combustion of fuel at lower temperatures. In February, the snow cover eliminates soil sources, while fuel and energy impacts persist. Elevated concentrations of ions in coarse (2.0, 5.0, 10 microns) and sub-micron (0.8 micron) particles indicate combined local and regional sources. These patterns can be seen in Figure 2a.

In spring, when the snow cover begins to melt, intense solar radiation increases turbulent heat exchange and convective processes in the atmosphere. This leads to the release of a significant amount of pollutants accumulated in the winter snow cover into the atmosphere and contributes to increased air pollution during snowmelt. The higher concentrations of ions in atmospheric aerosol particles indicate the influence of local sources of pollution in the atmosphere in March.

During the summer months (June and July), the influence of the fuel-energy complex decreases, but as shown by Golobokova et al. study (2021), there is still a localized influx of pollutants into the atmosphere during warm seasons from anthropogenic areas of the city. Meteorological factors such as wind speed and precipitation also influence the variability in aerosol composition. Increased wind speeds and higher precipitation lead to higher concentrations of aerosols with ions in July. In July 2019, these concentrations were caused by smoke from forest fires, as seen in Figure 2a.

When averaging the monthly mean values, data points exceeding three standard deviations in accordance with a normal distribution were excluded to prevent distortion of the average indicators, but they were retained during the analysis of daily measurements. During inter-day observations, it was established that prolonged influence of air masses arriving from one of the transfer directions significantly affected changes in ion concentrations across all particle fractions, among which Na^+ , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , and SO_4^{2-} were predominant. For example, a three-day influx of air masses from the northwest direction, recorded from February 16 to 19, 2024 (Fig. 3a), led to an increase in Na^+ ion concentration by 2.5-3 times, Ca^{2+} by 1.5-2 times, NO_3^- by 7.5-10 times, and SO_4^{2-} by 3 times on particles measuring 0.8, 2.0, and 5.0 μm compared to the initial measurement period of February 14-15 during south-southwest air mass transport. The concentration of Cl^- ions increased on average by 1.5 times on larger particles measuring 2.0, 5.0, and 10 μm . The most significant increase was

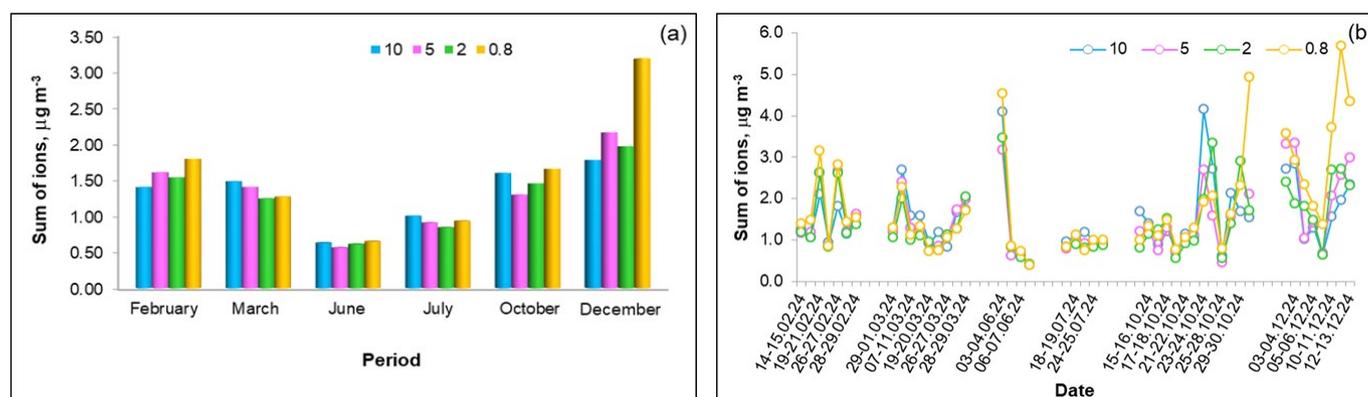


Fig.2. Seasonal (a) and average daily (b) variability of total ion concentration in atmospheric aerosol of different size fractions (10, 5.0, 2.0, 0.8 microns) at Irkutsk station in 2024, mg/m^3 .

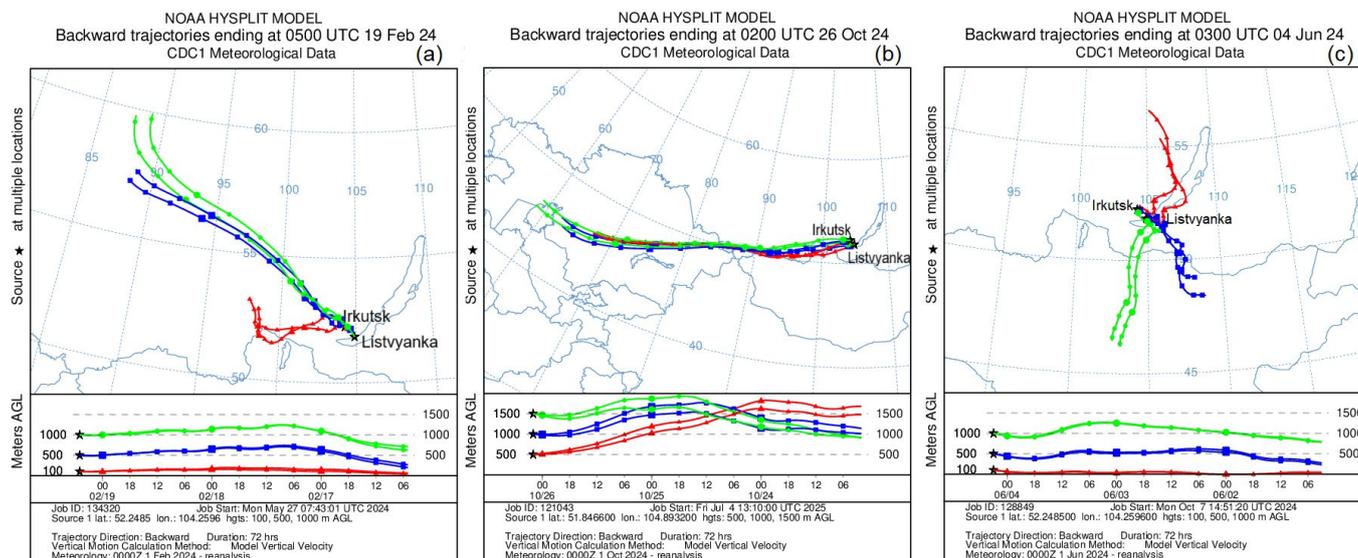


Fig.3. Back trajectories of air masses from altitudes of 500 (red), 1000 (blue), 1500 (green) m in the database of the National Oceanic and Atmospheric Administration of the USA, based on the HYSPLIT model: a) February 16-19, 2024, b) October 24-26, 2024, c) June 3-4, 2024. (ARL NOAA, <http://www.arl.noaa.gov>).

observed for K^+ ions (5.8 times) on particles of 0.8 μm . Additionally, an increase in Mg^{2+} ion concentration was observed across all size fractions, ranging from 2.2 to 9.2 times. When the wind direction shifted to west and south-southwest, a decrease in the concentration of all ions was observed, which subsequently increased again during northwest wind transport on February 26-27, March 4-5, March 27-29, October 16-18, and December 11-12 (see Fig. 2b). The increase in ion concentrations on both coarse and fine particles during this air mass direction indicates both their local origin and long-range interregional transport from the Krasnoyarsk Krai region during these periods of atmospheric particle sampling. Dominant northwestern and northern air mass flows at higher altitudes, moving over industrial regions of the Krasnoyarsk Krai and Irkutsk regions, become enriched with anthropogenic particles. Downward anticyclonic flows subsequently elevate total ion concentrations in atmospheric aerosol at observation sites (Golobokova et al., 2025a). Prolonged influx of westerly air masses (22–29 October; Fig. 3b) originating from Kazakhstan and the Republic of Tuva primarily elevated concentrations of Na^+ , K^+ , Cl^- , and SO_4^{2-} ions in coarse particles (2.0, 5.0, 10 μm).

The observed increase in the amount of ions on June 3-4, 2024 in all aerosol fractions occurred against the background of the arrival of air masses from the southern part of Mongolia (Fig. 3, c). In the south of this country, coal is mined in the Gobi Desert, as well as gold and copper deposits are being developed. In turn, pollutants from the most industrially developed central and eastern regions of China, including Shenyang, Shanghai, and Beijing, enter the territory of Mongolia during the southern and southeastern air mass transfers (Zhamsueva et al., 2012). The resulting temperature inversion allows the dust aerosol to be transported over long distances. A comparison of the ion concentration in the aerosol collected on June 3-4 with the average values of June showed a significant increase in the content of all ions from 3 to 12.5 times. Thus, the concen-

tration of NH_4^+ , Mg^{2+} , and Cl^- increased from 4.0 to 11.9 times on particles of 10 microns. The particle size of 5.0 μm and a marked increase in concentrations was observed in ions Na^+ , Mg^{2+} and NO_3^- with a maximum increase up to 12 times for Mg^{2+} ions Na^+ and NO_3^- – 7.3 times. A similar trend was observed for particles of 2.0 microns, in which the increase in concentrations of NH_4^+ , Mg^{2+} and Cl^- ions varied from 6.5 times for Cl^- to 10.3 times for Mg^{2+} . On small particles of 0.8 microns, the maximum increase in concentrations was observed for ions K^+ (10.9 times), Mg^{2+} (10.1 times) and NO_3^- (8.8 times).

In the seasonal distribution of the amount of ions in the aerosols of different size fractions at Listvyanka station, as well as at Irkutsk station, the highest ion values were observed in the autumn-winter months of October, December, and February (Fig. 4a). In October and December, there is no stable snow cover at Listvyanka, similar to the urban station, and the heating season is in effect. In February, during the peak of the intense winter tourist season on Lake Baikal, a large number of vehicles accumulate in a limited area along the coast and on the lake ice, further increasing air pollution from exhaust gases. In March, ion concentrations decreased to average values close to those typical of summer. The increase in ion concentration in July compared to June is due to the transport of smoke aerosols from forest fires into the observation area.

In the average daily dynamics, an increase in the amount of ions in the aerosol occurred when air masses arrived from the north-western and northern directions, a decrease occurred when they arrived from the southern (SE, SE, SE, SE) directions. On July 19-22, 2024, the smell of smoke from forest fires was felt in the atmosphere of Listvyanka station. As shown by the reverse trajectories, smoke aerosol came from the northern regions of the Irkutsk region and from the south-southeastern direction from the territory of Buryatia (Fig. 5, a). At the same time, at an altitude of 3,000 m (green line, Fig. 5, b), air masses were moving

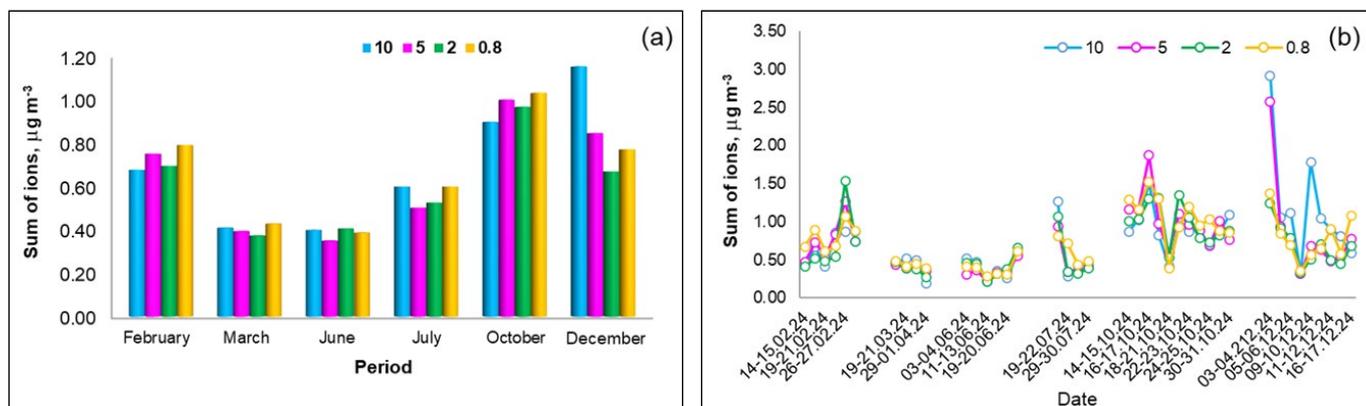


Fig.4. Seasonal (a) and average daily (b) variability of total ion concentration in atmospheric aerosol of different size fractions (10, 5.0, 2.0, 0.8 microns) at Listvyanka station in 2024, mg m^{-3} .

from the territory of Mongolia. The concentration of Na^+ (2.1-6.9 times), NH_4^+ (1.9-8.0 times), K^+ (2.8-3.7 times), Cl^- (2.3-4.0 times) and SO_4^{2-} ions in the aerosol of all size fractions increased the most compared to the average values in June. As is known, depending on the type of biomass burned, volatile inorganic components condense in the form of chlorides and sulfates into a group of particles enriched with potassium. Chlorides and potassium are markers of forest fire smoke and are used in modeling the transport of plumes from forest fires (Reid et al., 2005).

The seasonal variability of total ion concentrations in the aerosol collected at the Bolshiye Koty station differed from that at the Irkutsk and Listvyanka stations. The lowest ion concentrations were observed during the cold period on large particles of 2.0, 5.0, and 10 μm . Due to the geographical remoteness from major industrial centers, the small population in the settlement, and the presence of stable snow and ice cover on the lake surface, atmospheric processes conducive to pollutant accumulation are significantly limited here. These factors minimized anthropogenic impacts on air quality in Bolshiye Koty (Fig. 6).

During summer, the influence of the underlying surface and anthropogenic factors related to water

transport was observed. The total ion content on 10 μm particles increased by 4 times, indicating the dominance of local sources in shaping the aerosol's chemical composition during the tourist season.

The total ion concentration increased due to the rise in concentrations of NH_4^+ (by 16 times), K^+ (by 10 times), Mg^{2+} (by 8.0 times), Ca^{2+} (by 9.8 times), Cl^- (by 3.5 times), and SO_4^{2-} (by 3.4 times). An almost proportional increase in Ca^{2+} ions was observed across particles of all sizes. The sum of ions on particles measuring 2.0 and 5.0 μm increased by 2.5 and 3.0 times, respectively, while on 0.8 μm particles it increased by 1.6 times. On July 9-10, 2024, a smoky odor was detected in the atmosphere (Fig. 6b). During this period, the sum of ions on particles of 10 μm size increased by 5.0 times, and on particles of 5.0 μm – by 1.6 times compared to the average values for July. The influence of the forest fire from July 19 to 22, which was most clearly manifested in changes in the ionic composition at the Listvyanka station, was significantly less pronounced at the Bolshiye Koty site. Nevertheless, the smoke influx from the fire, despite its lower intensity, led to an increase in Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , and K^+ ions in the aerosol, especially on larger particles.

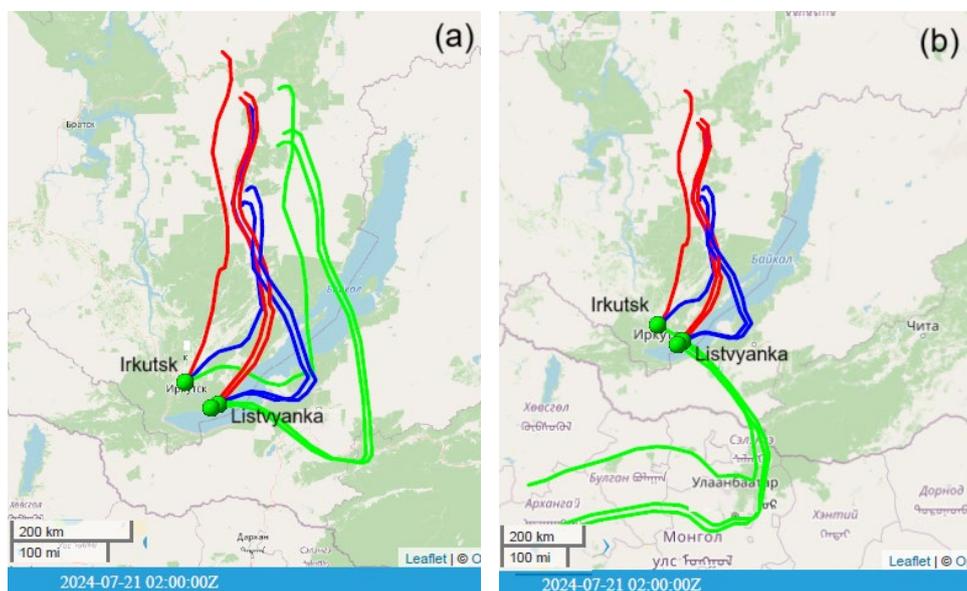


Fig.5. The arrival of smoke aerosol on the territory of the Baikal region and the lake area. Baikal on July 21, 2024: a) at altitudes of 100 (red), 500 (blue), 1500 (green) m; b) 100 (red), 500 (blue), 3000 (green) m. (ARL NOAA, <http://www.arl.noaa.gov>).

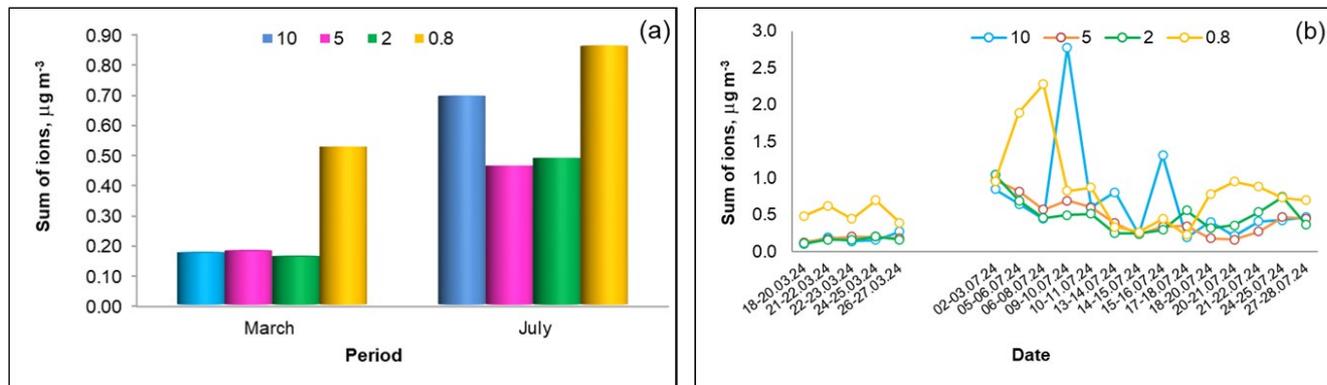


Fig.6. Seasonal (a) and average daily (b) variability of total ion concentration in atmospheric aerosol of different size fractions (10, 5.0, 2.0, 0.8 microns) at Bolshiye Koty station in 2024, mg/m^3 .

3.2. Trace element composition of atmospheric aerosol

During the analysis of the trace element composition of the aerosol in February–March at the Irkutsk station, it was revealed that the highest concentrations with a value above 1.0 ng/m^3 were determined for the elements Cr, As, Sn, Ni, V, Pb, Cu, Sr, Mn, Ti, Ba, Zn, Fe, B and Al. Their share in the total trace element composition averaged 98-99%. During the summer and at the beginning of the heating season, this range was expanded by Mo, Sb, W and Co. Concentrations of Zn, Cu, Al, Fe, and B were highest in the aerosol at the hospital in Large Cats in March, with Ni and Sn added to them in the summer. In total, the proportion of trace elements in the aerosol with a concentration of more than 1.0 ng/m^3 at the Bolshiye Koty station was 93% in March and 97% in July. The aerosol at Listvyanka station contained increased concentrations of Ba, Sr, Mn, Ti, Ni, Zn, Cu, Pb, B, Fe, and Al, which accounted for 97% of the total amount of elements. The total content of trace elements at Irkutsk station was on average more than four times higher than in Listvyanka AA, and more than eight times higher in Bolshiye Koty aerosol.

In the seasonal distribution of Irkutsk aerosol, increased amounts of trace elements, as well as amounts of ions, were observed in October and December. The excess of the total concentration of trace elements in June, compared with the cold period, was 2.3-2.4 times for particles of 2.0, 5.0 and 10 microns. On $0.8 \mu\text{m}$ particles, the differences were below one standard deviation (Fig. 7).

The most interesting was the elemental composition of the aerosol collected on July 22, when the smell of smoke from forest fires was present in the air. A significant increase in the concentration of trace elements on particles of 10 microns in size was observed in the aerosol compared with the average values in June. The level of the elements increased from three to twenty-two times, with the largest excess recorded for Co, Ni and Pb. The maximum increase in concentration, reaching 107 times, was noted for Zn. It should be noted that plumes from forest fires attract not only active aerial migrants of forest fires, but also elements accumulating in fires (Cr, Ni, Co, V, Th, Al), as well as emissions from industrial enterprises and soil dust (Shcherbov and Zhurkova, 2014; Schlosser et al., 2017).

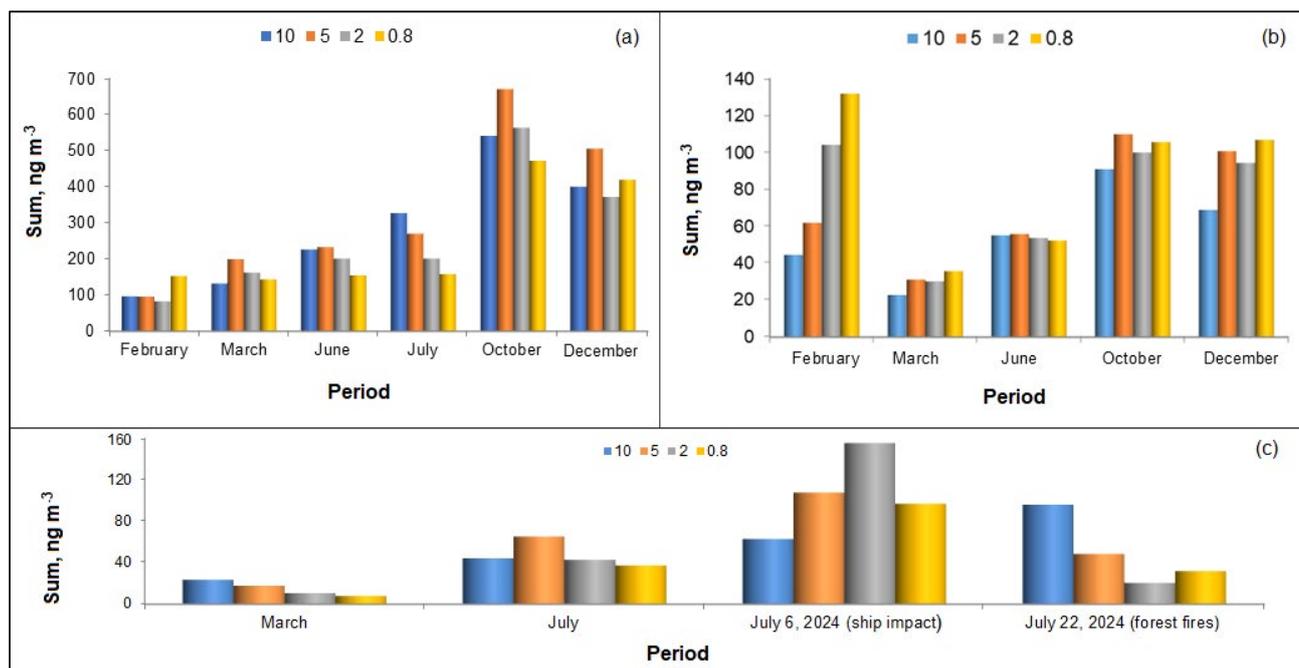


Fig.7. Seasonal variability of the total concentration of trace elements in atmospheric aerosol at Irkutsk (a), Listvyanka (b) and Bolshiye Koty stations in 2024, ng/m^3 .

In contrast to the elemental composition of the aerosol in Irkutsk, at Listvyanka station in the seasonal cycle, the maximum concentrations of trace elements, as well as ions, were observed not only in October and December, but also in February. During the peak tourist season on Lake Baikal, the content of elements such as B, Al, V, Co, Ni, Cu, As, and Sr increased especially. The highest levels of trace elements were observed on particles measuring 0.8 and 2.0 microns (see Fig. 7, b). In March, the concentration of trace elements decreased. However, in June, they increased again due to the accumulation of plant and soil material in the atmospheric air.

At the Bolshiye Koty station, a distribution of microelement concentrations similar to that of Irkutsk and Listvyanka was observed, with lower levels in March and an increase in July. To ensure greater reliability of the average data, samples with high concentrations were excluded: those collected on July 6 under the influence of a local source (ship engine operation near the station) and on July 22 under the influence of smoke emissions from forest fires. The total element concentration during the summer period was 1.9 times higher on 10 μm particles, 3.7 times higher on 5.0 μm particles, 4.1 times higher on 2.0 μm particles, and 4.8 times higher on 0.8 μm particles compared to the spring period (see Fig. 7, c).

In aerosols collected during ship engine operation near the sampling point for several hours, elevated concentrations of all detectable trace elements were identified. A comparative analysis with the average July values demonstrated more than a threefold increase for the following elements: Be, B, Se, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Mo, Cd, Sn, Pb, U, Ag. These elements were primarily sorbed onto particles of 2.0 and 0.8 μm . As a result of comparing element concentrations in aerosol samples collected during smoke emission events with similar average July data, it was found that, similar to the aerosols from Irkutsk, the highest concentration increases occurred on 10 μm particles, with a magnitude ranging from three to twenty-two times. However, this was observed for a smaller number of elements. Notably, the concentrations of uranium (U), lithium (Li), and cobalt (Co) increased most significantly.

Analysis of enrichment factors (EF) for trace elements in aerosol particles from Irkutsk, Listvyanka, and Bolshiye Koty stations classified Be, Al, Ti, V, Mn, Fe, Co, Sr, Ba, Th, and U as components of terrigenous origin ($EF < 10$). Elements Ni, Zn, As, Mo, Cd, Sn, Sb, W, and Pb were assigned to the group with $EF 10\text{--}1000$. The highest aerosol enrichment ($EF > 1000$) was found for B, Cu, Se, Cd, Sn, and Ag. Both groups of elements are of anthropogenic origin.

The largest contribution to the overall level of air pollution at the Irkutsk station, in order of increasing significance, was made by the elements $Fe > Mn > Al > Cu > Ba > Ni > Zn > Pb > Se > Co$. A smaller number of elements involved in the overall air pollution level were identified at the Listvyanka station ($Fe > Cu > Ni > Al > Mn > Zn > Se > Co$) and Bolshiye Koty ($Fe > Cu > Ni > Mn$).

3.3. Distribution of soot particles and PAHs in aerosol composition

Soot particles are formed as a result of incomplete combustion of organic fuel and may include carbon particles (black carbon) as well as other organic compounds involved in air pollution. They are directly emitted into the atmosphere as fine particles with a radius of less than 2.5 μm and can easily sorb onto aerosol particles of various sizes (EPA Report-450, 2012). The residence time of soot in the atmosphere is estimated to be several days or weeks. Studies on black carbon over Lake Baikal confirm that the distribution of its mass concentration across the Baikal water area is uneven and indicate the influence of emissions transported from industrial regions of Pribaikalye along the Angara and Selenga river valleys from large settlements, tourist sites on the coast, as well as during forest fires (Khodzher et al., 2020).

As shown in Figure 8, the highest concentrations of soot particles were observed in the aerosol at the Irkutsk station. Seasonal variations in soot concentration across all stations show a decrease during summer, with maximum values recorded in winter. The most detailed analysis of daily dynamics was conducted in February at the Irkutsk station. Low concentrations

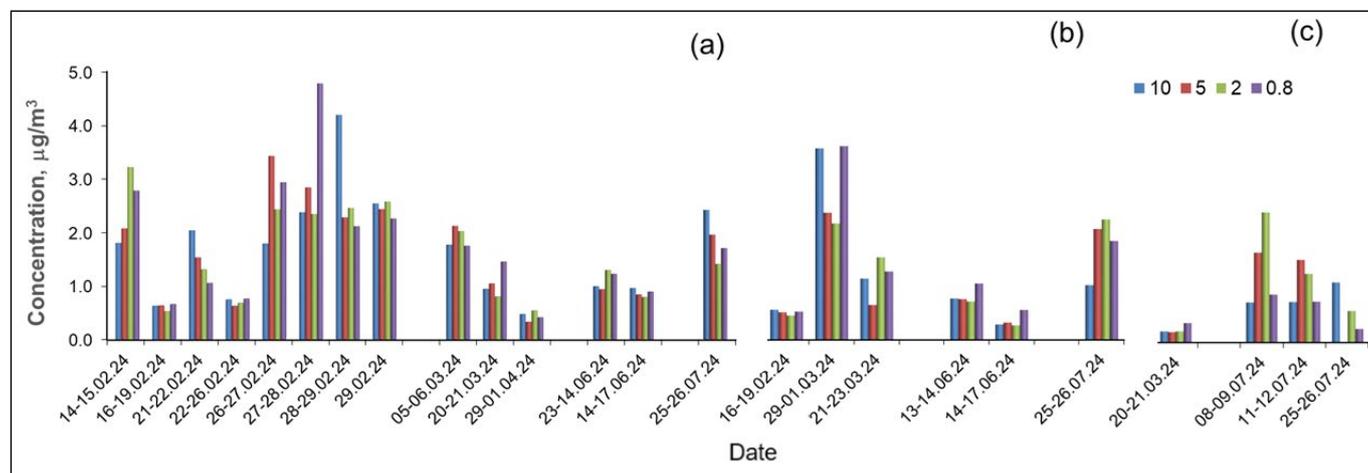


Fig.8. Average daily variability of soot particles within the atmospheric aerosol across different size fractions at the stations Irkutsk (a), Listvyanka (b), and Bolshiye Koty (c) in 2024, $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

were observed during periods of increased wind speed and precipitation (February 16-19 and February 22-26). Considering that soot particles can remain in the atmosphere for an extended period, elevated soot concentrations in the aerosol collected on July 25-26 are likely related to the presence of smoke aerosols from July 19-22, when forest fires had a stronger impact over Irkutsk and Listvyanka than in Bolshiye Koty.

Soot particles often serve as carriers for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), which adsorb onto their surfaces, increasing their stability and health hazards. Measurements of soot and PAHs on particles of different size fractions were conducted for the first time at monitoring stations in Southern Pribaikalye.

During the cold period (February-March), the average sum of PAHs in the aerosol from Irkutsk ranged from 0.4 to 0.5 ng/m³ on particles measuring 2.0, 5.0, and 10 μm, and was 2.2 ng/m³ on 0.8 μm particles. In larger particles, the high-molecular-weight PAH group with two, three, and four benzene rings predominated, accounting for an average of 31%, 31%, and 29%, respectively. On 0.8 μm particles, there was an increase in PAH compounds with five benzene rings from 17% to 25%, while the contribution of PAHs with two rings decreased from 6% to 9%. Among individual PAHs, phenanthrene and naphthalene dominated on 5.0 and 10 μm particles; phenanthrene, naphthalene, and fluoranthene on 2.0 μm particles; and pyrene, phenanthrene, fluoranthene, and benz[b]fluoranthene on 0.8 μm particles. Based on diagnostic ratios such as fluoranthene/(fluoranthene + pyrene), values greater than 0.4 indicate pyrogenic sources (Tobiszewski and Namiesnik, 2012; Sun et al., 2023). For particles of 10 μm with ratios between 0.5-0.7, PAHs are attributed to pyrogenic sources like thermal power plants (TPPs) and vehicle emissions; for particles of 5 μm with ratios from 0.3-0.8, both pyrogenic and petrogenic sources are identified; while in smaller particles (0.8 and 2.0 μm) with ratios ranging from 0.06 to 0.3, PAH sources are associated with natural processes.

At Listvyanka station during the cold period (March), the sum of PAHs in the aerosol ranged from 0.2 ng/m³ on large particles to 0.4 ng/m³ on small particles of 0.8 μm. A comparative analysis between Listvyanka and Irkutsk revealed that total PAH concentrations in urban aerosols exceeded those at Listvyanka by a factor of approximately 1.9–2.3 for large particles and up to six times higher for small particles, indicating more intense atmospheric pollution in the city environment. The dominant PAH groups at Listvyanka were compounds with two rings (40%), three rings (34%), and four rings (22%). The proportion of five-ring PAHs was only about 2%. Among individual PAHs on 10 μm particles, phenanthrene and naphthalene prevailed; on 2.0 and 5.0 μm particles – phenanthrene, naphthalene, and methyl-naphthalene; and on 0.8 μm particles – naphthalene, phenanthrene, and fluoranthene. The ratio fluoranthene/(fluoranthene + pyrene), varying from approximately 0.7 to 0.9 across all fractions, indicated pyrogenic sources of PAHs in Listvyanka aerosols.

In March, at the Bolshiye Koty station, the average values of the total PAHs were in the same range

as at the Listvyanka station: from 0.2 to 0.3 ng/m³ in coarse particles and about 0.7 ng/m³ in 0.8 μm particles. Unlike Irkutsk and Listvyanka, the predominant group of PAHs in the aerosols of Bolshiye Koty consisted of compounds with three benzene rings (39%). The contribution of compounds with two rings was 31%, and with four rings – 24%. Notably, heavier compounds with five benzene rings were present in all size fractions, accounting for 5–8%, with an average of about 6%. Among individual PAHs in this fraction, phenanthrene, fluoranthene, and benz[b]fluoranthene predominated. In particles up to 10 μm, the highest concentrations were for 2-methyl-naphthalene, phenanthrene, and naphthalene; in the 5.0 and 2.0 μm fractions – fluoranthene, naphthalene, and phenanthrene. Pyrogenic sources were the main contributors to PAHs in the aerosols of this station.

During the summer period (July-August), PAH analysis was conducted only at Irkutsk station. The total PAH levels exceeded those observed during the cold period, and average values increased as particle size decreased: about 0.8 ng/m³ on 10 μm particles, about 0.9 ng/m³ on 5.0 μm particles, about 1.0 ng/m³ on 2.0 μm particles, and approximately 1.3 ng/m³ on 0.8 μm particles. In the aerosols, compounds with two and three benzene rings predominated, accounting for approximately 41% and 31%, respectively. Compounds with four rings made up about 22%. In June, compounds with five and six rings were absent; however, their share varied from 4% to 10% in July. In August, their proportion increased significantly and reached up to 39% on particles of 0.8 μm size. This dynamic indicates changes in sources and processes forming aerosol particles during summer and an increase in heavier PAHs with more benzene rings toward late summer.

Among individual PAHs in coarse aerosol fractions were naphthalene, phenanthrene, and 2-methyl-naphthalene; in submicron particles – naphthalene, benz[b]fluoranthene, and phenanthrene. According to diagnostic ratio methods, the sources of PAHs adsorbed onto aerosol particles during summer were predominantly pyrogenic.

3.4. Morphology and elemental composition of individual particles

The morphology and elemental composition of individual particles were analyzed. The sizes of individual particles ranged from tens of nanometers to tens of micrometers. During the cold period, particles of fly ash and soot predominated at Irkutsk, while at Listvyanka and Bolshiye Koty stations, particles of fly ash, soot, and mineral matter were prevalent. Soot agglomerates most often settled on particles smaller than 2.0 microns and were among the most common air pollutants at Irkutsk and Listvyanka stations (Fig. 9, positions 1, 5, 9). Fly ash particles (Fig. 9, positions 2, 6, 10) were aluminosilicate combustion spheres with diameters up to 10 microns. Elemental analysis of fly ash revealed significant enrichment with oxygen, aluminum, and silicates, as well as the presence of carbon, iron, calcium, and other elements.

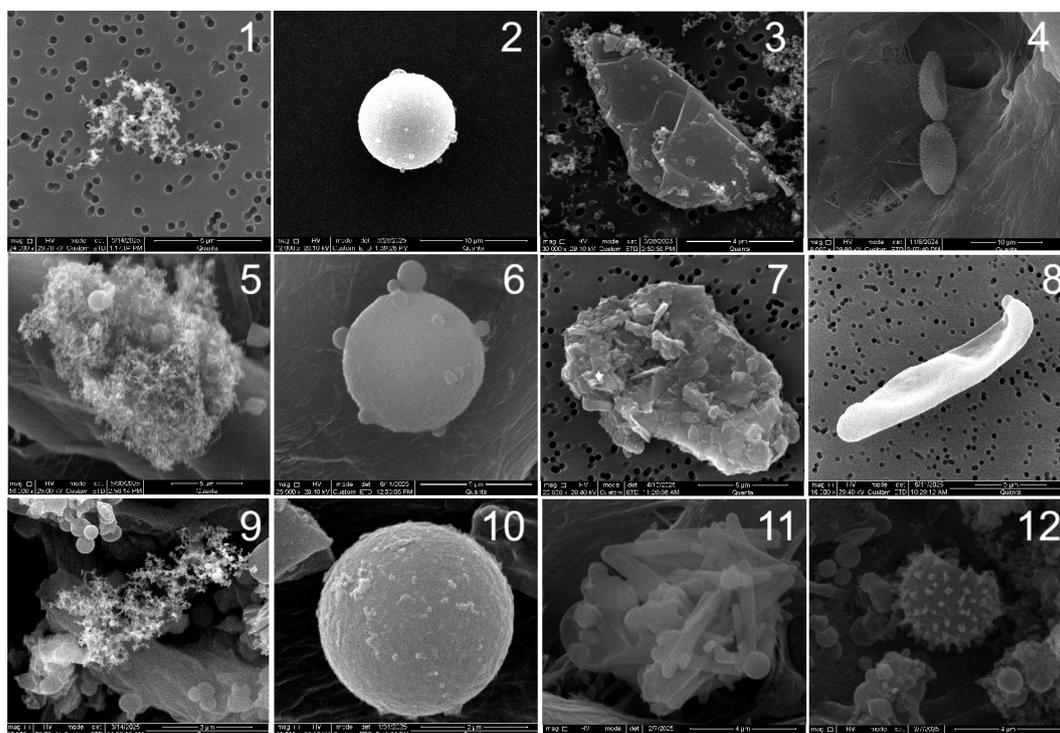


Fig.9. SEM images of particles in surface atmospheric aerosol at Irkutsk (positions 1-4), Listvyanka (positions 5-8) and Bolshiye Koty (positions 9-12) stations: soot particles (positions 1, 5, 9); fly ash (positions 2, 6, 10); mineral particles (positions 3, 7, 11); biogenic particles (positions 4, 8, 12).

During the warm season, mineral and biogenic particles dominated at all stations. Mineral-origin particles were irregularly shaped and consisted of various silicates and aluminosilicates containing impurities of alkaline (potassium, sodium), alkaline earth (calcium, magnesium), and heavy metals (iron, zinc, titanium, copper, chromium, manganese, and others). Biogenic particles mainly included fungal spores, plant pollen, brochosomes, and other bioaerosols.

4. Discussion

Analysis of the ionic composition data of different aerosol fractions showed that seasonal characteristics, pollution sources, and the influence of other natural and anthropogenic factors vary significantly across all three stations. Irkutsk is more susceptible to anthropogenic impacts due to the proximity of thermal power plants, industrial sources, and urban transportation, while Listvyanka is more affected by tourism activities (automobile and water transport), regional transport of pollutants, and forest fires. The Bolshiye Koty station has a lower level of pollution owing to its remoteness from pollution sources and its orographic features. High concentrations of Ca^{2+} , NO_3^- , and SO_4^{2-} ions in various particle size fractions, especially during northwest transport, are characteristic for Irkutsk and Listvyanka stations in February. In Irkutsk during winter, elevated concentrations of Na^+ and Cl^- ions are observed on larger particles; their increase in the atmosphere is associated with the accumulation of reagents in snow used for road de-icing. In summer, at the Irkutsk station, there were deposits of impurities from certain regions of Mongolia, Kazakhstan, and the

Tuvan Republic. At the Listvyanka station, a more significant influence of forest fires on aerosol composition was noted, manifested by increased concentrations of Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , and K^+ ions. The Bolshiye Koty station exhibits the lowest content of ions in individual aerosol fractions during the cold period; however, in summer, under the influence of local sources (forest fires, water transport), an increase in concentrations of NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , and Ca^{2+} ions is observed.

In the microelement composition of aerosol in Irkutsk, the total concentration of microelements is on average 4–8 times higher than in Listvyanka and Bolshiye Koty. Seasonal dynamics of the distribution of the total microelement content in Irkutsk aerosol showed an increase during spring and summer periods. In the aerosol of Listvyanka, maximum values of total microelements, similar to macrocomponents, were recorded in February, with the highest concentrations observed on fine particles of 0.8 and 2.0 μm . The lowest microelement concentrations were registered at Bolshiye Koty station.

Analysis of enrichment coefficients of aerosol particles with microelements across all stations revealed that elements Be, Al, Ti, V, Mn, Fe, Co, Sr, Ba, Th, and U belong to the terrigenous group with enrichment coefficients (EC) less than 10. At Irkutsk station, the most significant contributors to overall pollution levels were Fe, Mn, Al, Cu, Ba, Ni, Zn, Pb, Se, and Co; the share of Fe ranged from 56% to 75% during winter and from 78% to 94% in summer. At Listvyanka station, dominant elements included Fe, Cu, Mn, Ni, Al, Zn, Se, and Co, with Fe reaching up to 92% during the warm season. At Bolshiye Koty station, the largest contributions came from Fe, Cu, Ni, and Mn, with Fe accounting for up to 80% during winter.

High concentrations of soot (black carbon and other organic compounds) during the cold season are characteristic of the Irkutsk and Listvyanka stations. At Bolshiye Koty station, an increase in black carbon levels was observed during the summer period. Carbon-containing particles are capable of sorbing various chemical compounds.

The sources of PAHs (polycyclic aromatic hydrocarbons) include the combustion of coal, oil, and wood, as well as emissions from vehicles and industrial enterprises. These compounds are highly resistant to degradation in the environment, tend to condense onto aerosol particles, and settle onto surfaces. In aerosols collected at monitoring stations, the predominant contribution of PAHs with two to three rings ranged from 29% to 41%, while PAHs with four to six rings had a smaller contribution, averaging from 2% to 9%. It was noted that in the aerosol from Irkutsk, collected in February 2024, the proportion of four-ring PAHs increased from 16% to 43%. Among the identified PAHs, phenanthrene was the most frequently detected; it occurs both in natural fossil hydrocarbons and is formed during the thermal decomposition of organic materials. Other commonly dominant compounds included naphthalene and 2-methylnaphthalene. Their concentrations are associated with emissions from transportation during incomplete fuel combustion and stationary sources.

The sizes of individual aerosol particles analyzed by scanning electron microscopy ranged from tens of nanometers to tens of micrometers. The samples contained soot, fly ash, mineral particles, and bioaerosols. During the cold period, soot and ash particles predominated; in warm periods, alkali earth metals along with heavy metals and biogenic aerosols were more prevalent. The presence of mineral particles in atmospheric aerosols is primarily due to terrigenous (earth-derived) origin.

5. Conclusions

A comprehensive analysis of the chemical composition of atmospheric aerosol fractions of different sizes, collected during various seasons of 2024 at the Listvyanka (rural), Bolshiye Koty (background) stations in the Central Ecological Zone, and the Irkutsk (urban) station in the Atmospheric Influence Zone of Southern Baikal, was conducted for the first time. Seasonal and spatial differences in the composition of aerosol particles across different size fractions at monitoring stations were identified, driven by a combination of natural and anthropogenic factors, including industrial activity, forest fires, and transportation. During winter, the highest concentrations of Ca^{2+} , NO_3^- , and SO_4^{2-} ions across all aerosol fractions were observed at the Irkutsk and Listvyanka stations. These increases were especially noted during northwest transport from industrial areas of Krasnoyarsk Krai and Irkutsk region. In Irkutsk, in addition to these ions, elevated levels of Na^+ and Cl^- ions were detected on larger particles. In summer, deposits from regions such as Mongolia, Kazakhstan, and the Republic of Tuva were identified, confirmed by back-trajectory analyses at altitudes of 500, 1000, and

1500 meters. The influence of forest fires on aerosol composition was particularly evident at the Listvyanka station, where during smoke events, concentrations of Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , and K^+ ions increased. At Bolshiye Koty station in winter, the lowest concentrations of all analyzed ions were recorded, confirming its status as a background site with minimal influence from local or regional pollution sources. During summer, under the impact of forest fires and water transport activities at this station, there was a slight increase in concentrations of NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} , and Ca^{2+} ions in aerosol particles.

The majority of microelements (Be, Al, Ti, V, Mn, Fe, Co, Sr, Ba, Th, U) in aerosols across the studied territories primarily have a natural origin. Significant anthropogenic enrichment was observed for elements such as B, Cu, Se, Cd, Sn, Ag, which were the most prominent pollutants in the air with enrichment coefficients (EC) exceeding 1000. Seasonal dynamics at the Irkutsk station showed an increase in total microelement content during spring and summer periods. At the Listvyanka station, seasonal maxima of microelements shifted to autumn (October) and winter (December and February). In summer, at Bolshiye Koty station, the distribution of microelement concentrations in aerosol particles was similar to that of Listvyanka: water transport and forest fires significantly influenced their composition during this period.

Analysis of the PAH composition revealed a predominance of compounds with two to three benzene rings, and diagnostic ratios indicated their pyrogenic sources. During the summer period, an increase in the content of heavier PAHs with a greater number of rings was observed, suggesting a shift in sources involved in aerosol formation.

The particle morphology study using scanning electron microscopy revealed that the main components in the studied regions were soot and volatile ash during the winter period, and mineral particles and bioaerosols in summer. The presence of mineral particles in atmospheric aerosols is primarily due to their terrigenous origin.

Acknowledgements

The work was carried out with financial support from the state assignment project: No. 0279-2021-0014 for the analysis of aerosol particle composition, and from the Russian Science Foundation (RSF) grant No. 19-77-20058P for the statistical processing of the obtained results.

Conflict of Interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Anenberg S.C., Belova A., Brandt J. et al. 2016. Survey of Ambient Air Pollution Health Risk Assessment Tools. *Risk Analysis* 36(9): 1718-1736. DOI: [10.1111/risa.12540](https://doi.org/10.1111/risa.12540)
ARL NOAA Atmospheric Resource Laboratory NOAA. URL: <http://www.arl.noaa.gov> (last accessed: 07.05.2025).

- Belozerova O.Yu., Egorov V.I., Chebikin A.P. 2019. Use of Methods of Electronic Microscopy, Mass-Spectrometry and Roentgenospectral Electronic Probe Micro-Analyzer in Ecological and Analytical Studies. Elemental Composition of Blue Micro-Particles of Unknown Nature Observed in Suspended Substance of Lake Baikal. *Izvestiya Baikal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Baikal State University] 29(4): 533-544. DOI: [10.17150/2500-2759.2019.29\(4\).533-544](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2019.29(4).533-544) (In Russian)
- Fiedler V., Nau R., Ludmann S. et al. 2009. East Asian SO₂ pollution plume over Europe – Part 1: Airborne trace gas measurements and source identification by particle dispersion model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9: 4717-4728. DOI: [10.5194/acp-9-4717-2009](https://doi.org/10.5194/acp-9-4717-2009)
- Golobokova L., Netsvetaeva O., Khodzher T. et al. 2021. Atmospheric Deposition on the Southwest Coast of the Southern Basin of Lake Baikal. *Atmosphere* 12(10): 1230. DOI: [10.3390/atmos12101357](https://doi.org/10.3390/atmos12101357)
- Golobokova L.P., Khodzher T.V., Gromov S.A. et al. 2025. Long-term studies of the chemical composition of atmospheric aerosol at Russian EANET stations. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics] 38(06): 422–431. DOI: [10.15372/AOO20250602](https://doi.org/10.15372/AOO20250602) (in Russian)
- Golobokova L.P., Khodzher T.V., Obolkin V.A. et al. 2025. Physical and Chemical Characteristics of Different Aerosol Fractions in the Southern Baikal Region (Russia) During the Warm Season. *Atmosphere* 16(7): 829. DOI: [10.3390/atmos16070829](https://doi.org/10.3390/atmos16070829)
- Gorshkov A.G., Izosimova O.N., Kustova O.V. et al. 2021. Wildfires as a Source of PAHs in Surface Waters of Background Areas (Lake Baikal, Russia). *Water* 13(19): 1-16. DOI: [10.3390/w13192636](https://doi.org/10.3390/w13192636)
- Grennfelt P., Engleryd A., Forsius M. et al. 2020. Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy. *Ambio* 49: 849–864. DOI: [10.1007/s13280-019-01244-4](https://doi.org/10.1007/s13280-019-01244-4)
- Ionel I., Makra L., Csépe Z. et al. 2018. Assessment of relationship between meteorological elements and air pollutants load in an urban environment. *Journal of Environmental Protection and Ecology* 4: 1462-1471.
- Karagulian F., Belis C.A., Dora C. et al. 2015. Contributions to cities ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment* 120: 475-483. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2015.08.087](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087)
- Khodzher T.V., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S. et al. 2019. Ship-Based Studies of Aerosol-Gas Admixtures over Lake Baikal Basin in Summer 2018. *Optika atmosfery i okeana* [Atmospheric and Oceanic Optics] 32(4): 434-441. DOI: [10.1134/S1024856019040067](https://doi.org/10.1134/S1024856019040067) (in Russian)
- Khodzher T.V., Golobokova L.P., Obolkin V.A. 2020. Chemical composition of aerosol and gas impurities in the Baikal region during wildfires in the summer of 2018-2019. *Proceedings of SPIE* 11560: 1-7. DOI: [10.1117/12.2575424](https://doi.org/10.1117/12.2575424)
- Manousakas M., Popovicheva O., Evangelidou N. 2020. Aerosol carbonaceous, elemental and ionic composition variability and origin at the Siberian High Arctic, Cape Baranova. *Tellus. Series B: Chemical and Physical Meteorology* 72: 1-14. DOI: [10.1080/16000889.2020.1803708](https://doi.org/10.1080/16000889.2020.1803708)
- Marinaite I.I., Khodzher T.V., Obolkin V.A. et al. 2023. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{1.0} Particles in the Atmosphere over the Southern Baikal Region. *Russian Meteorology and Hydrology* 48(4): 300-308. DOI: [10.3103/S1068373923040027](https://doi.org/10.3103/S1068373923040027)
- 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. DOI: [10.1080/00207233.2016](https://doi.org/10.1080/00207233.2016)
- Obolkin V., Molozhnikova E., Shikhovtsev M. 2021. Sulfur and Nitrogen Oxides in the Atmosphere of Lake Baikal: Sources, Automatic Monitoring, and Environmental Risks. *Atmosphere* 12(10): 1-10. DOI: [10.3390/atmos12101348](https://doi.org/10.3390/atmos12101348)
- Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation of 17 February 2022 No 106 "On approval of the methodology for determining high and very high air pollution". URL: <https://base.garant.ru/403588206> (last accessed: 09.04.2025)
- Pogodaeva T.V., Lopatina I.N., Bashenkhaeva N.V. et al. 2020. Benthic dissolved organic carbon fluxes and distribution in Lake Baikal sediments. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 879-881. DOI: [10.31951/2658-3518-2020-A-4-879](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-879)
- Reid J., Koppmann R., Eck T. et al. 2005. A review of biomass burning emissions. Part 2: Intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics* 5: 799–825. DOI: [10.5194/acp-5-799-2005](https://doi.org/10.5194/acp-5-799-2005)
- Rudnick R.L., Gao S. 2014. Composition of the continental crust. In *Treatise on Geochemistry*. Elsevier: Amsterdam. The Netherlands 4: 1-51. DOI: [10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6)
- Schlosser J.S., Braun R.A., Bradley T. et al. 2017. Analysis of aerosol composition data for western United States wildfires between 2005 and 2015: Dust emissions, chloride depletion, and most enhanced aerosol constituents. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122(16): 8951–8966. DOI: [10.1002/2017JD026547](https://doi.org/10.1002/2017JD026547)
- Shcherbov B.L., Zhurkova I.S. 2014. Forest fires as an important factor of scattering and concentration of chemical elements in Siberia. *Geology and mineral resources of Siberia S3-2*: 37-40.
- Sun L., Ai X., Yao X. et al. 2023. Relationship between atmospheric pollution and polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh snow during heavy pollution episodes in a cold city, northeast China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 260: 1-10. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2023.115091](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115091)
- Tobiszewski M., Namiesnik J. 2012. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. *Environmental Pollution* 162: 110-119. DOI: [10.1016/j.envpol.2011.10.025](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.10.025)
- EPA Report U.S. EPA-450/R-12-001. 2012. U.S. Environmental Protection Agency, Washington: D.C.
- Yue X.L., Gao Q.X. 2018. Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions. *Advances in Climate Change Research* 9(4): 243-252. DOI: [10.1016/j.accre.2018.12.003](https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.12.003)
- Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Starikov A.V. et al. 2012. Chemical Composition of Aerosols in the Atmosphere of Mongolia. *Russian Meteorology and Hydrology* 8: 59-68. (In Russian)

Химический состав различных фракций атмосферного аэрозоля в Южном Прибайкалье в 2024 г.

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Голобокова Л.П.*^{ORCID}, Ходжер Т.В.^{ORCID}, Лопатина И.Н.^{ORCID}, Маринайте И.И.^{ORCID},
Оболкин В.А.^{ORCID}, Онищук Н.А.^{ORCID}, Чебунина Н.С.^{ORCID}

Лимнологический институт СО РАН, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

АННОТАЦИЯ. Впервые по сезонам года проведены комплексные исследования химического состава частиц аэрозоля размерных фракций 0.8, 2.0, 5.0, 10 мкм на трех станциях мониторинга атмосферы: в промышленном центре Южного Прибайкалья г. Иркутске и в Центральной экологической зоне западного побережья Южного Байкала на станциях Листвянка, Большие Коты. Проанализированы морфология, размеры отдельных частиц, ионный и микроэлементный состав, полициклические ароматические углеводороды, сажа. Показано, что пространственные и сезонные различия в составе атмосферного аэрозоля на трех станциях обусловлены сочетанием антропогенных и природных факторов: промышленное воздействие, метеорологические условия, лесные пожары и транспорт. Увеличение концентраций загрязняющих веществ в частицах разных размерных фракций наблюдалось при поступлении воздушных масс с северо-западного и северного направлений, где расположены промышленные центры Иркутской области и Красноярского края. В летний период отмечались заносы примесей при поступлении воздушных масс с южных направлений – из Бурятии, Монголии, Республики Тыва, Казахстана.

Ключевые слова: Байкальский регион, атмосфера, аэрозоль, ионы, микроэлементы, морфология частиц, органические загрязнители

Для цитирования: Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Лопатина И.Н., Маринайте И.И., Оболкин В.А., Онищук Н.А., Чебунина Н.С. Химический состав различных фракций атмосферного аэрозоля в Южном Прибайкалье в 2024 г. // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 960-982. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-960

1. Введение

Антропогенные выбросы загрязняющих веществ в атмосферу представляют собой наиболее сложный для контроля компонент загрязнения окружающей среды, оказывающий воздействие не только на атмосферный воздух, но и на водные и наземные экосистемы. Основным критерием для установления нормативов оценки качества атмосферного воздуха является степень влияния содержащихся в нем загрязняющих веществ на здоровье человека и окружающую среду (Anenberg et al., 2016; Yue and Gao, 2018; Ionel et al., 2018; Grennfelt et al., 2020). Аэрозольные частицы в атмосфере играют важную роль в формировании погодных условий и климатических процессов, как на региональном, так и на глобальном уровнях, что обуславливает необходимость тщательного контроля их физических параметров и химического состава.

В работе, посвященной современному обзору загрязнения окружающей среды различными источ-

никами в отдельных регионах мира, проведен анализ переноса загрязняющих веществ на региональном и межконтинентальном уровнях (Karagulian et al., 2015). Известно, что компоненты, загрязняющие атмосферу, могут переноситься в стратосферных слоях на значительные расстояния от источника выброса, достигая десятков тысяч километров (Fiedler et al., 2009). Крупные частицы быстро удаляются из атмосферы посредством сухого и влажного осаждения, в то время как мелкие имеют более длительный срок существования и более опасны для окружающей среды и человека. Это особенно актуально для фоновых территорий, таких как Сибирь, где чувствительность к крупномасштабным эмиссиям, возникающим в результате лесных пожаров, сжигания природного газа и попутного нефтяного газа, является высокой (Khodzher et al., 2019; Manousakas et al., 2020).

В пределах зоны атмосферного влияния на озеро Байкал расположено несколько городов Иркутской области, которые характеризуются высо-

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: lg@lin.irk.ru (Л.П. Голобокова)

Поступила: 01 августа 2025; **Принята:** 19 августа 2025;
Опубликована online: 31 августа 2025

© Автор(ы) 2025. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



ким уровнем загрязнения атмосферы. Воздушные выбросы в виде газовых примесей и аэрозольного вещества из источников, находящихся на территории, прилегающей к озеру (шириной до 60 км), имеют значительную вероятность оседания загрязняющих веществ на акватории Байкала, колеблющуюся от 10 до 100%. Это создает экологические риски для уникальной экосистемы озера. Экологическая опасность аэрозольных выбросов обусловлена множеством факторов, включая изменения в их химическом и дисперсном составе, сорбировании стойких органических веществ, тяжелых металлов и других загрязнителей на отдельных частицах.

Наибольшую антропогенную нагрузку испытывает атмосфера Южного Байкала, куда примеси поступают от региональных источников загрязнения, расположенных в долине реки Ангары на удалении 50-100 км к северо-западу от озера и крупных населенных пунктов побережья озера (Obolkin et al., 2016; 2021). Эти источники включают выбросы теплоэнергетики, промышленных предприятий, транспорта и другие виды деятельности человека, которые ухудшают качество воздуха и могут негативно сказываться на состоянии окружающей среды.

Основная задача исследования заключалась в комплексном анализе химического состава частиц разных размерных фракций аэрозоля по сезонам года в нескольких районах Южного Прибайкалья с разной степенью антропогенной загруженности. Проведенные исследования подчеркивают необходимость такого мониторинга атмосферного аэрозоля для оценки экологического состояния региона и детального выявления источников загрязнения.

2. Материалы и методы

2.1. Станции мониторинга, отбор проб атмосферного аэрозоля

Атмосферный аэрозоль отбирался в разные сезоны (зима, весна, лето, осень) 2024 года на станциях Листвянка, Большие Коты, расположенных на территории Центральной экологической зоны (ЦЭЗ) Южного Байкала, а также в Зоне атмосферного влияния (ЗАВ) - в г. Иркутске. Урбанизированная станция в г. Иркутске (52.14 N, 104.15 E) находится на левом берегу р. Ангара в 70 км от оз. Байкал. Отбор проб происходил на территории Лимнологического института СО РАН в южной части города. Листвянка (51.50 N, 104.53 E) является сельской станцией, расположена выше одноименного поселка Листвянка на прибрежном холме юго-западного побережья озера Байкал. Станция находится на высоте около 200 м над уровнем озера на территории Астрофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН. Обе станции входят в сеть станций мониторинга кислотных осадений Юго-Восточной Азии – EANET (Голобокова и др., 2025). Наблюдения на станции Большие Коты (51.90 N, 105.07 E) проводились на базе научного стационара Лимнологического института СО РАН вблизи небольшого прибрежного поселка Большие Коты. Поселок Большие Коты удален на 24 км от п.

Листвянка (Рис. 1). Исследования по составу атмосферного аэрозоля, выполненные ранее в этом районе показали фоновые характеристики концентрации ионов при изучении атмосферы Южного Байкала. При минимальном влиянии внешних воздействий (отсутствие костров на берегу, судов в прибрежной акватории), концентрация суммы ионов в аэрозоле на этой станции соответствует уровню фоновых районов озера Байкал и не превышает 1,0 мкг/м³ (Golobokova et al., 2021).

Атмосферный аэрозоль на станциях мониторинга отбирался каскадным импактором ИКС-10 (ООО Корпорация «ИНТек», г. Екатеринбург, Россия) с объемной скоростью 10 л/мин, позволяющем разделять аэрозольные частицы на фракции 0.8, 2.0, 5.0, 10 мкм.

2.2. Определение химического состава аэрозоля

Аналитические работы выполнялись на приборной базе Центра коллективного пользования «Ультрамикрoанализ» Лимнологического института СО РАН с использованием стандартизированных методик.

Для достижения полной экстракции ионов NH₄⁺, K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻ аэрозольные фильтры подвергались обработке в ультразвуковой ванне. Анализ ионного состава аэрозоля проводился с использованием ионной системы ICS-3000 производства компании Dionex Corporation (Саннивейл, Калифорния, США). В процессе анализа применялись колонки Analytical column IonPac AS19 (диаметр 2 мм, длина 250 мм) и IonPac CS12A (диаметр 2 мм, длина 250 мм). Система генерации элюентов позволяет проводить анализ анионов и катионов на уровне следовых концентраций.



Рис.1. Схема станций отбора проб атмосферного аэрозоля.

Методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой на масс-спектрометре «Agilent 7500 ce» производства компании Agilent Scientific Instruments (Санта-Клара, Калифорния, США) проводилось определение концентрации 27 микроэлементов- Li, Be, B, Al, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Ba, W, Pb, Th, U, Ag и Tl. Отобранные примеси извлекались смесью концентрированной азотной кислоты и пероксида водорода при температуре 95°C в ультразвуковой бане. Предел обнаружения каждого элемента определялся как минимальная концентрация, при которой сигнал от образца превышал фоновую составляющую в три раза при доверительной вероятности 98% (Golobokova et al., 2025).

Концентрации двадцати одного полиароматического углеводорода (ПАУ) в аэрозольной фазе определены методом внутренних стандартов с использованием растворов фенатрена-d10, хризена-d12 и перилена-d12 в качестве добавок. Соединения, включающие нафталин, 2-метилнафталин, 1-метилнафталин, аценафтен, аценафтилен, флуорен, фенантрен, антрацен, флуорантен, пирен, ретен, бенз(а)антрацен, хризен, бенз(В)флуорантен, бензо(К)флуорантен, бензо(е)пирен, бенз(а)пирен, перилен, дибенз(а,Н)антрацен, индено(1,2,3-CD) пирен и бенз(г,н,и)перилен, анализировались на хромато-масс-спектрометрической системе «Agilent, GC System 7890B, 7000 CGC/MSTripleQuad» (Санта-Клара, Калифорния, США) (Gorshkov et al., 2021; Маринайте и др., 2023).

Определение общего содержания углеродсодержащих соединений (сажа, черный углерод) на аэрозольных фильтрах выполнялось методом высокотемпературного сжигания в среде кислорода на анализаторе общего органического углерода и азота Vario TOC cube с ИК-детектором (Elementar Analysensysteme GmbH, Германия). Стандартное отклонение не превышало 0,01. В качестве стандарта использовали гидрофталат калия (Pogodaeva et al., 2020).

На растровом электронном микроскопе FEI Quanta 200 (FEI Company, Хилсборо, Орегон, США), укомплектованного энергодисперсионной приставкой рентгеновского микроанализа EDAX, исследовали морфологию и элементный состав отдельных частиц. Для снижения электрического заряда частицы напыляли золотом с помощью автоматизированной вакуумной установки Desktop Sputter and Carbon Coater DSCR (Массачусетс, США) (Белозерова и др., 2019).

Для идентификации источников аэрозоля проводился анализ обратных траекторий воздушных масс за трехдневный период, взятых с высот 500, 1000 и 1500 метров. В качестве исходных данных использовались данные, предоставленные Национальным управлением океанических и атмосферных исследований США, основанные на модели HYSPLIT (<http://www.arl.noaa.gov>).

Для расчета коэффициентов обогащения микроэлементного состава использовали формулу:

$$KO_i = [(C_i/Al)_{\text{аэр}}] / [(C_i/Al)_{\text{зк}}] \quad (1),$$

где KO_i – коэффициент обогащения, $(C_i/Э)$ – отношение концентрации i -того элемента и реперного элемента (Al) в аэрозолях (аэр) и в земной коре (зк) (Rudnick and Gao, 2014).

Вклад микроэлементов в общий уровень загрязнения воздуха рассчитывали по формуле (Приказ Министерства, 2022 <https://base.garant.ru/403588206>):

Вклад, % = $[(C_i/ПДК_{\text{ср}})^{\beta_i} / \sum (C_i/ПДК_{\text{ср}})^{\beta_i}] \times 100$ (2), где β_i – константа для различных классов опасности, C_i – концентрация микроэлемента в составе аэрозоля, ПДК_{ср} – предельно допустимая среднесуточная величина концентрации микроэлемента в воздухе населенных мест.

3. Результаты

3.1. Ионный состав атмосферного аэрозоля

Образцы атмосферного аэрозоля на станции Иркутск были собраны в феврале, марте, июне, июле, октябре и декабре 2024 года. Данный подход позволил охватить все сезоны года и учесть разные метеорологические условия, характерные для исследуемой территории. Сезонная изменчивость суммы ионов в составе атмосферного аэрозоля (АА) на станции Иркутск была типичной для континентальных урбанизированных районов. Наиболее высокие уровни концентрации ионов в АА наблюдались в осенне-зимний период и обусловлены, прежде всего, деятельностью топливно-энергетического комплекса. Значительное повышение их концентраций определено в октябре и связано с началом отопительного сезона. Более высокие значения в декабре объясняются отсутствием устойчивого снежного покрова и увеличением антропогенного воздействия, связанного с ростом объемов сжигаемого топлива при понижении температуры воздуха. В феврале, когда подстилающая поверхность еще полностью покрыта снегом, почвенные источники отсутствуют, влияние топливно-энергетического комплекса сохраняется. Повышенные суммы ионов как на грубодисперсных частицах (2,0, 5,0, 10 мкм), так и на субмикронных (<1,0 мкм) свидетельствуют о влиянии как локальных, так и региональных источников. Эти закономерности хорошо демонстрируются данными, представленными на Рисунке 2, а.

Весной, когда начинается таяние снежного покрова, при интенсивном притоке солнечной радиации усиливается турбулентный теплообмен и процессы конвекции в атмосфере. При таянии снега в атмосферу попадает значительное количество примесей, накопившихся в снежном покрове за зимний период, что способствует усилению загрязнения воздуха. Более высокие концентрации ионов в АА на крупных частицах в марте указывают на влияние локальных источников примесей в атмосферу.

В летний период (июнь, июль) влияние топливно-энергетического комплекса снижается. Однако, как показано в работе (Golobokova et al., 2025), в Иркутске в теплый период года наблюда-

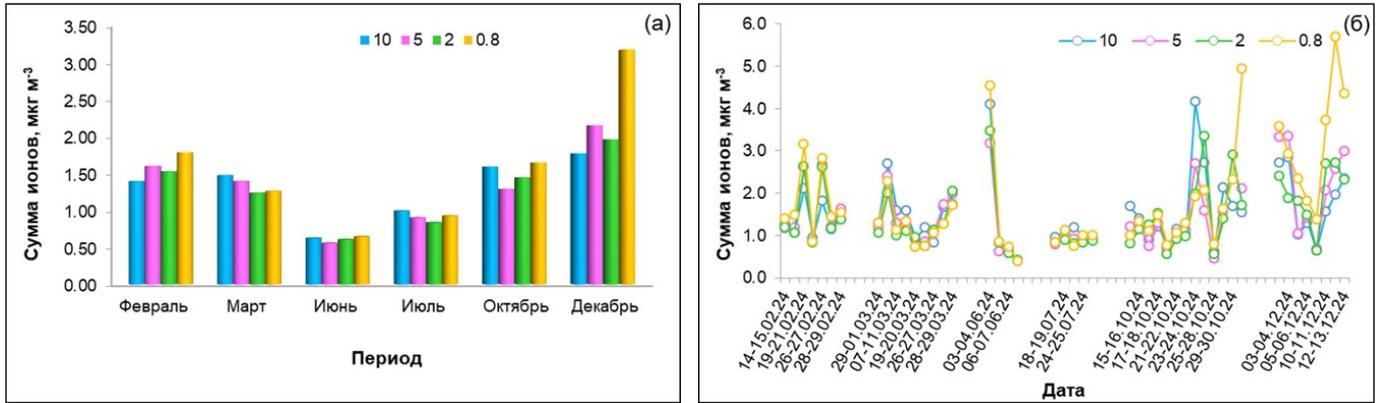


Рис.2. Сезонная (а) и среднесуточная (б) изменчивость суммы ионов в составе атмосферного аэрозоля разных размерных фракций (10, 5.0, 2.0, 0.8 мкм) на станции Иркутск в 2024 г., мкг/м³.

лось локальное поступление примесей в атмосферу из антропогенно-нагруженных районов города, особенно при северных и восточных ветрах. Кроме того, летом на изменчивость ионного состава аэрозоля оказывают влияние такие метеорологические факторы, как усиление ветра, рост количества атмосферных осадков, лесные пожары. Более высокие концентрации ионов в АА в июле 2024 г. обусловлены поступлением дымового аэрозоля от лесных пожаров (см. Рис. 2, а).

При усреднении среднемесячных значений данные, выходящие за пределы трех стандартных отклонений в соответствии с нормальным распределением, были исключены для предотвращения искажения средних показателей, но при анализе среднесуточных измерений сохранены. В ходе межсуточных наблюдений установлено, что длительное воздействие воздушных масс, поступающих с одного из направлений переноса в исследуемый район, оказывало значительное влияние на изменение концентрации ионов в составе всех фракций частиц, среди которых главными были Na⁺, Ca²⁺, Cl⁻, NO₃⁻ и SO₄²⁻. Так, например, трехсуточное поступление воздушных масс с северо-западного направления, зафиксированное с 16 по 19 февраля 2024 года

(Рис. 3, а), привело к увеличению концентрации ионов Na⁺ в 2.5–3 раза, Ca²⁺ – в 1.5–2 раза, NO₃⁻ – в 7.5–10 раз и SO₄²⁻ – в 3 раза на частицах размером 0.8, 2.0 и 5.0 мкм по сравнению с начальным периодом измерений 14-15 февраля при юго-юго-западном переносе воздушных масс. Концентрация ионов Cl⁻ при этом возросла в среднем в 1,5 раза на частицах 2.0, 5.0 и 10 мкм. Наиболее значительное увеличение концентрации ионов K⁺ (5.8 раза), фиксировалось на частицах 0.8 мкм. Кроме того, наблюдалось повышение концентрации ионов Mg²⁺ во всех размерных фракциях в 2.2-9.2 раза.

При смене направления ветра на западное и юго-юго-западное произошло снижение концентрации всех ионов, которое вновь возросло при северо-западном переносе 26-27 февраля, 4-5 марта, 27-29 марта, 16-18 октября, 11-12 декабря (см. Рис. 2, б). Повышение концентрации ионов на крупных и мелких частицах при этом направлении воздушных масс свидетельствует как об локальном их происхождении, так и о дальнем межрегиональном переносе со стороны Красноярского края в эти периоды отбора аэрозольных частиц. Ранее было показано, что господствующие на высотах северо-западные и северные потоки воздушных масс, смещаясь

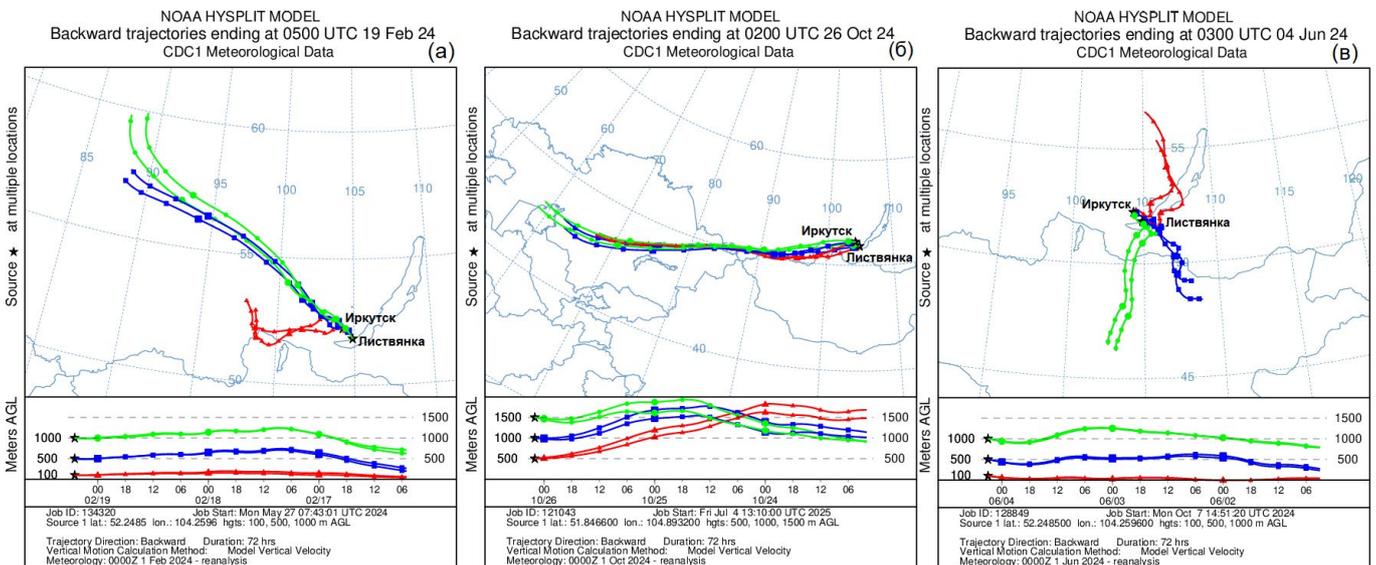


Рис.3. Обратные траектории движения воздушных масс на высотах 500, 1000, 1500м (базы данных Национального управления океанических и атмосферных исследований США, основанные на модели HYSPLIT а)16-19 февраля 2024 г., б) 24-26 октября 2024 г., в) 3-4 июня 2024 г. (ARL NOAA, <http://www.arl.noaa.gov>)

над промышленными районами Красноярского края и Иркутской области, обогащаются частицами антропогенного происхождения и с нисходящими потоками в антициклоне приводят к росту суммы ионов в атмосферном аэрозоле в районе наблюдения (Голобокова и др., 2025).

Длительное поступление воздушных масс с западного направления (22-29 октября, Рис. 3, б) с территорий Казахстана и Республики Тыва в основном сопровождалось повышением концентраций ионов Na^+ , K^+ , Cl^- и SO_4^{2-} в частицах 2.0, 5.0 и 10 мкм.

Наблюдающееся повышение суммы ионов 3-4 июня 2024 г. во всех фракциях аэрозоля происходило на фоне поступления воздушных масс с южных районов Монголии (Рис. 3, в). На юге этой страны в пустыне Гоби производится добыча каменного угля, а также разрабатываются месторождения золота и меди. В свою очередь на территорию Монголии при южных и юго-восточных переносах воздушных масс поступают загрязняющие примеси из наиболее промышленно развитых центральных и восточных районов Китая, включающих Шэньян, Шанхай, Пекин (Жамсуева и др., 2012). Возникающая температурная инверсия позволяет пылевому аэрозолю переноситься на большие расстояния. Сравнение концентраций ионов в аэрозоле, собранном 3-4 июня, со средними значениями июня показало значительное увеличение содержания всех ионов от 3 до 12.5 раз. Так, на частицах 10 мкм произошло увеличение концентраций NH_4^+ , Mg^{2+} и Cl^- от 4.0 до 11.9 раз. На частицах 5.0 мкм заметное увеличение концентраций наблюдалось для ионов Na^+ , Mg^{2+} и NO_3^- с максимальным повышением до 12 раз для Mg^{2+} , ионов Na^+ и NO_3^- – в 7.3 раза. Аналогичная тенденция прослеживалась и для частиц 2.0 мкм, рост концентраций ионов NH_4^+ , Mg^{2+} и Cl^- в которых изменяется от 6.5 раз по Cl^- до 10.3 раз по Mg^{2+} . На мелких частицах 0.8 мкм максимальное повышение концентраций наблюдались для K^+ (10.9 раз), Mg^{2+} (10.1 раз) и NO_3^- (8.8 раз).

В сезонном распределении суммы ионов в аэрозоле разных размерных фракций на станции Листвянка, как и на станции Иркутск, наиболее высокие значения ионов наблюдались в осенне-зимние месяцы – октябре, декабре и феврале (Рис. 4, а). В октябре и декабре в Листвянке, как и на станции Иркутск, отсутствует устойчивый снежный покров,

и действует отопительный период. В феврале, в пик интенсивного зимнего туристического сезона на оз. Байкал, в п. Листвянка на ограниченной территории вдоль побережья и на льду озера скапливается большое количество автотранспорта, что дополнительно увеличивает загрязнение воздуха выхлопными газами. Увеличение концентрации ионов в июле связано с поступлением дымового аэрозоля от лесных пожаров в район наблюдений.

В среднесуточной динамике повышение суммы ионов в аэрозоле происходило при поступлении воздушных масс с северо-западных и северных направлений, снижение – при поступлении с южных (ЮВ, ЮЮВ, Ю, ЮЮЗ, ЮЗ) направлений. Так 19-22 июля 2024 г. в атмосфере на ст. Листвянка ощущался запах дыма от лесных пожаров. Как показали обратные траектории, дымовой аэрозоль поступал с северного и юго-юго-восточного направлений - с территории Бурятии (Рис. 5, а). В то же время на высоте 3000 м (зеленые линии) воздушные массы передвигались с территории Монголии (Рис. 5, б). В составе аэрозоля всех размерных фракций наиболее всего повысилась концентрация ионов Na^+ (2.1-6.9 раз), NH_4^+ (1.9-8.0 раз), K^+ (2.8-3.7 раз), Cl^- (2.3-4.0 раз) и SO_4^{2-} в 4 раза. Как известно, в зависимости от вида сжигаемой биомассы летучие неорганические компоненты конденсируются в виде хлоридов и сульфатов в группу частиц, обогащенных калием. Хлориды и калий являются маркерами дымов лесных пожаров и используются при моделировании переноса шлейфов от лесных пожаров (Reid et al., 2005).

В составе аэрозоля, собранного на станции Большие Коты, сезонная изменчивость суммы ионов отличалась от таковой на станциях Иркутск и Листвянка. Наиболее низкие концентрации ионов наблюдались в холодный период на крупных частицах 2.0, 5.0 и 10 мкм. В результате географической удаленности от крупных промышленных центров, малого количества проживающих людей в поселке, наличие устойчивого снежного и ледового покрова на поверхности озера, атмосферные процессы, способствующие накоплению загрязняющих веществ, здесь существенно ограничены. Эти факторы снизили до минимальных величин антропогенное воздействие на качество атмосферного воздуха в поселке Большие Коты (Рис. 6). В летний период в этом районе наблюдалось воздействие подстилаю-

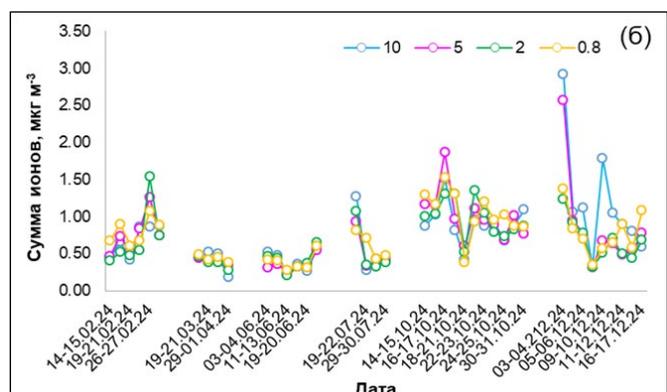
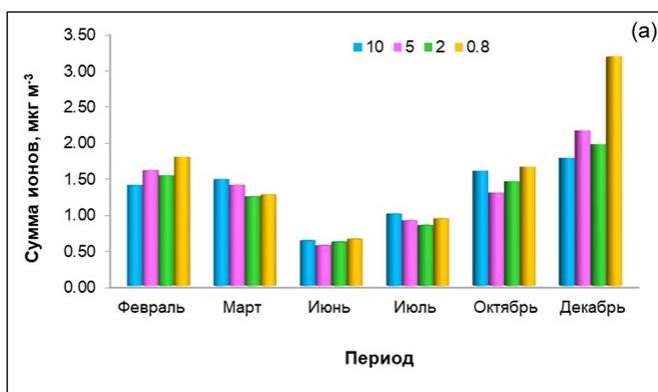


Рис.4. Сезонная (а) и среднесуточная (б) изменчивость суммы ионов в составе атмосферного аэрозоля разных размерных фракций на станции Листвянка в 2024 г., мкг/м³.

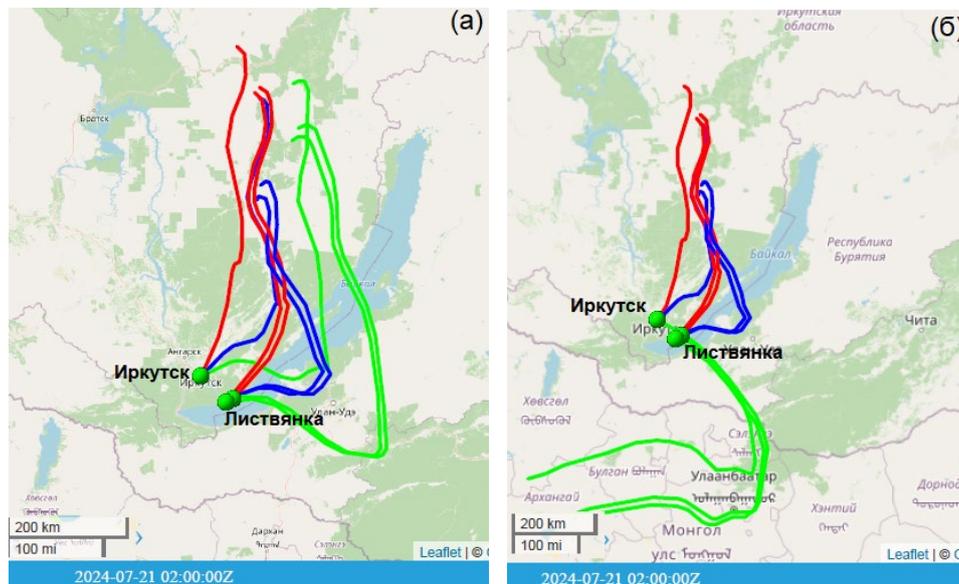


Рис.5. Поступление дымового аэрозоля на территорию Байкальского региона и акваторию оз. Байкал 21 июля 2024 г.: а) на высотах 100, 500, 1500 м; б) 100, 500, 3000 м (ARL NOAA, <http://www.arl.noaa.gov>).

щей поверхности и антропогенных факторов, связанных с водным транспортом. Произошло увеличение суммарного содержания ионов на частицах размером 10 мкм в 4 раза, что указывает на доминирование локальных источников в формировании химического состава атмосферного аэрозоля во время летнего туристического сезона. Общая концентрация суммы ионов возросла за счет роста концентрации ионов NH_4^+ (в 16 раз), K^+ (в 10 раз), Mg^{2+} (в 8.0 раз), Ca^{2+} (в 9.8 раз), Cl^- (в 3.5 раз), SO_4^{2-} (в 3.4 раза). Почти кратное повышение концентрации ионов Ca^{2+} наблюдалось на частицах всех размеров. Сумма ионов на частицах 2.0 и 5.0 мкм возросла в 2.5 и 3.0 раза, соответственно, на частицах 0.8 мкм – в 1.6 раз. 9-10 июля 2024 г. в атмосфере отмечался запах дыма (Рис. 6, б). В этот период зафиксирован рост суммы ионов на частицах размером 10 мкм – в 5.0 раз, 5.0 мкм – в 1.6 раза по сравнению со средними значениями за июль. Влияние лесного пожара с 19 по 22 июля, наиболее отчетливо проявившегося в изменении ионного состава на станции Листвянка, оказалось значительно менее выраженным в п. Большие Коты. Тем не менее, занос дыма от пожара, несмотря на его меньшую интенсивность, привел к повышению в АА ионов Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} и K^+ , особенно в крупных частицах.

3.2. Микроэлементный состав атмосферного аэрозоля

В ходе анализа микроэлементного состава аэрозоля в феврале-марте на станции Иркутск было выявлено, что наиболее высокие концентрации со значением выше 1.0 нг/м^3 определены для элементов Cr, As, Sn, Ni, V, Pb, Cu, Sr, Mn, Ti, Ba, Zn, Fe, В и Al. Их доля в общем микроэлементном составе составляла в среднем 98–99%. В летний период и в начале отопительного сезона этот ряд был расширен за счет Mo, Sb, W и Co. В аэрозоле на стационаре в Больших Котах наиболее высокими в марте были концентрации Zn, Cu, Al, Fe, В, в летний период к ним добавились Ni и Sn. В совокупности доля микроэлементов в аэрозоле с концентрацией более 1.0 нг/м^3 составила на станции Большие Коты в марте 93%, в июле – 97%. В составе аэрозоля на ст. Листвянка повышенную концентрацию имели Ba, Sr, Mn, Ti, Ni, Zn, Cu, Pb, В, Fe, Al, что составило 97% от общей суммы всех элементов. Суммарное содержание микроэлементов в аэрозоле на станции Иркутск в среднем превышает аналогичные показатели Листвянки более чем в четыре раза, в аэрозоле Больших Котов – более чем в восемь раз.

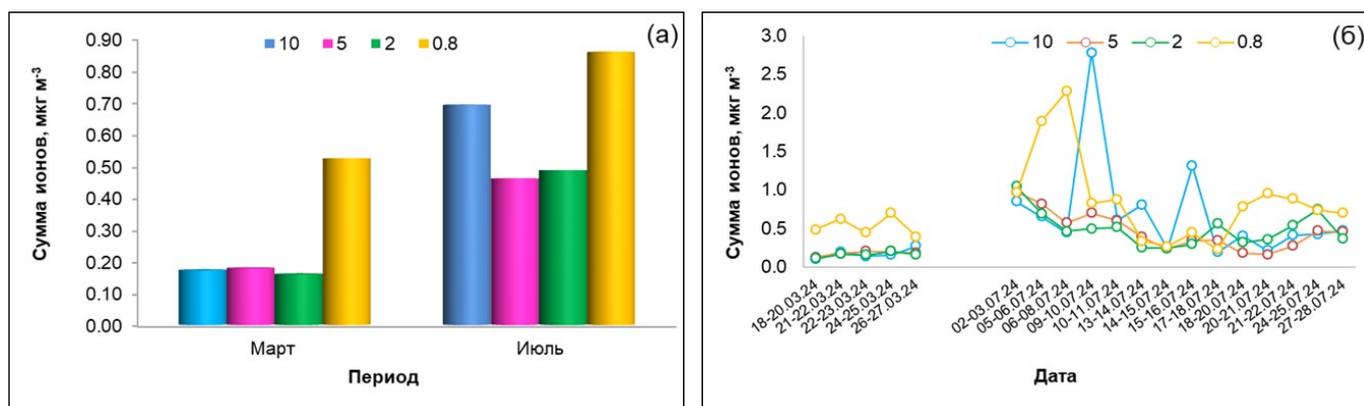


Рис.6. Сезонная (а) и среднесуточная (б) изменчивость суммы ионов в составе атмосферного аэрозоля разных размерных фракций аэрозоля на стационаре Большие Коты в 2024 г., мкг/м^3 .

В сезонном распределении в составе аэрозоля Иркутска повышенные суммы микроэлементов, как и суммы ионов, наблюдались в октябре и декабре. Превышение суммарной концентрации микроэлементов в июне, по сравнению с холодным периодом, составило в 2.3-2.4 раза на частицах 2.0, 5.0 и 10 мкм. На частицах 0,8 мкм различия были ниже одного среднеквадратичного отклонения (Рис. 7).

Наибольший интерес представлял элементный состав аэрозоля, собранный 22 июля, когда в воздухе присутствовал запах дыма от лесных пожаров. В аэрозоле наблюдалось значительное увеличение концентрации микроэлементов на частицах размером 10 мкм по сравнению со средними значениями июня. Уровень содержания элементов возрос от трех до двадцати двух раз, причем наибольшее превышение зафиксировано для Co, Ni и Pb. Максимальное увеличение концентрации, достигающее 107 раз, отмечено для Zn. Необходимо отметить, что со шлейфами от лесных пожаров увлекаются не только активные воздушные мигранты лесных пожаров, но и элементы, накапливающиеся на пожарищах (Cr, Ni, Co, V, Th, Al), а также выбросы промышленных предприятий и почвенная пыль (Щербов и Журкова, 2014; Schlosser et al., 2017). В отличие от элементного состава аэрозоля в г. Иркутске, на станции Листвянка в сезонном цикле максимальные значения концентрации микроэлементов, как и ионов, наблюдались не только в октябре и декабре, но и в феврале. В пик туристического сезона на Байкале, особенно возросло содержание таких элементов, как B, Al, V, Co, Ni, Cu, As, Sr. Самые высокие уровни микроэлементов наблюдались на частицах размером 0.8 и 2.0 мкм (см. Рис. 7, б). В марте концентрация микроэлементов снизилась, однако в июне вновь произошло их повышение в связи с накоплением в атмосферном воздухе растительного и почвенного материала.

На стационаре Большие Коты прослеживалось идентичное станциям Иркутск и Листвянка распределение концентраций микроэлементов с более низким содержанием в марте и повышением в июле. Для большей достоверности средних данных, исключены пробы с высокими концентрациями, отобранные 6 июля при влиянии локального источника (работа двигателя судна вблизи станции) и 22 июля при влиянии дымовой эмиссии лесных пожаров. Превышение суммарной концентрации элементов в летний период на частицах 10 мкм было в 1.9 раз, 5.0 мкм – в 3.7 раз, 2.0 мкм – в 4.1 раз, 0.8 мкм – в 4.8 раз выше, чем в весенний (Рис. 7, с).

В аэрозоле, собранном при влиянии работы двигателя судна, находящегося вблизи точки отбора проб в течение нескольких часов, выявлены повышенные концентрации всех определяемых микроэлементов. Сравнительный анализ с усредненными июльскими значениями продемонстрировал более чем трехкратное превышение для следующих элементов: Be, B, Se, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Mo, Cd, Sn, Pb, U, Ag, которые были сорбированы, в основном, на частицах 2.0 и 0.8 мкм. В результате сравнения концентраций элементов в аэрозоле, собранном при воздействии дымовой эмиссии, с аналогичными средними данными за июль выявлено, что, как и в аэрозоле Иркутска, наибольшее превышение концентраций наблюдалось на частицах 10 мкм, с такой же кратностью от трех до двадцати двух раз, но для меньшего числа элементов. Особенно заметно возросли концентрации урана (U), лития (Li) и кобальта (Co).

Результаты анализа коэффициентов обогащения микроэлементами аэрозольных частиц, отобранных на станциях Иркутск, Листвянка и Большие Коты, позволили классифицировать элементы Be, Al, Ti, V, Mn, Fe, Co, Sr, Ba, Th и U как компоненты терригенного происхождения с коэф-

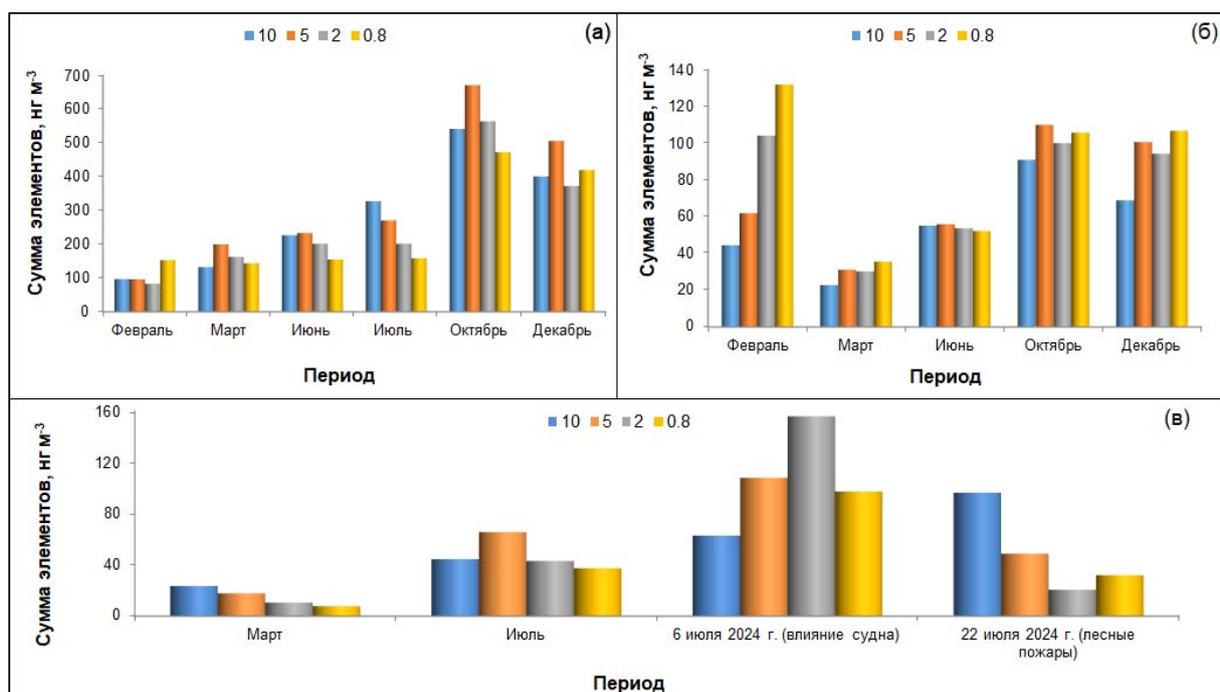


Рис.7. – Сезонная изменчивость суммы микроэлементов в составе атмосферного аэрозоля на станциях Иркутск (а), Листвянка (б) и Большие Коты (в) в 2024 г., нг/м³.

фициентами обогащения (КО) менее 10. Элементы Ni, Zn, As, Mo, Cd, Sn, Sb, W и Pb были отнесены к группе с коэффициентами обогащения от 10 до 1000. Наибольшее обогащение аэрозольных частиц (КО более 1000) обнаружено для элементов В, Cu, Se, Cd, Sn и Ag. Оба ряда элементов имеют техногенное происхождение.

Наибольший вклад в общий уровень загрязнения воздушной среды на станции Иркутск в порядке возрастания вносили элементы $Fe > Mn > Al > Cu > Ba > Ni > Zn > Pb > Se > Co$. Меньшее количество элементов, участвующих в общем уровне загрязнения воздуха, определено на станциях Листвянка ($Fe > Cu > Ni > Al > Mn > Zn > Se > Co$) и Большие Коты ($Fe > Cu > N > Mn$).

3.3. Распределение сажевых частиц и ПАУ в составе аэрозоля

Сажевые частицы образуются в результате неполного сгорания органического топлива и могут включать в себя углеродные частицы (черный уголь), а также другие органические соединения, которые участвуют в загрязнении воздуха. Они выбрасываются непосредственно в атмосферу в виде мелких частиц с радиусом менее 2.5 мкм и легко сорбируются на аэрозольных частицах разного размера (Report EPA-450, 2012). Время пребывания сажи в атмосфере исчисляется несколькими днями или неделями. Исследования по черному углероду, выполненные в атмосфере над Байкалом, подтверждают, что распределение массовой концентрации этого компонента над акваторией Байкала неравномерно и свидетельствуют о влиянии выбросов, переносимых из промышленных районов Прибайкалья по долинам рек Ангары, Селенги из крупных населенных пунктов, туристических мест на побережье, а также во время лесных пожаров (Khodzher et al., 2020).

Как следует из Рисунка 8, наиболее высокие концентрации сажевых частиц содержались в аэрозоле на станции Иркутск. В сезонном ходе концентрации сажи на всех станциях наблюдалось ее снижение в летний период, максимальные значе-

ния определены зимой. Наиболее подробно среднесуточная динамика концентраций сажи проанализирована в феврале на станции Иркутск. Низкие концентрации определены в периоды усиления скорости ветра и выпадения осадков (16-19 февраля, 22-26 февраля). Учитывая, что сажевые частицы могут длительно находиться в атмосфере, повышенные концентрации сажи в аэрозоле, собранном 25-26 июля, очевидно, связаны с наличием дымового аэрозоля 19-22 июля в атмосфере на территории Иркутска и Листвянки, где влияние лесных пожаров сказывалось сильнее, чем в Больших Котах.

Сажевые частицы часто служат носителями полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), которые прилипают к их поверхности, что увеличивает их стойкость и опасность для здоровья. Измерения сажи и ПАУ проводились на частицах разных размерных фракций проводились впервые на станциях мониторинга в Южном Прибайкалье.

В холодный период (февраль-март) в аэрозоле г. Иркутска средние значения суммы ПАУ изменялась от 0.4 до 0.5 нг/м³ на частицах размером 2.0, 5.0 и 10 мкм и составили 2.2 нг/м³ на частицах диаметром 0.8 мкм. В крупных частицах преобладала группа высокомолекулярных соединений с двумя, тремя и четырьмя бензольными кольцами, содержание которых составило в среднем 31%, 31% и 29%, соответственно. На частицах 0.8 мкм отмечалось повышение доли соединений ПАУ с пятью бензольными кольцами от 17% до 25%, а вклад ПАУ с двумя кольцами снижался от 6% до 9%. Среди индивидуальных ПАУ на частицах 5.0 и 10 мкм доминировали фенантрен и нафталин, на частицах 2.0 мкм – фенантрен, нафталин и флуорантен, на частицах 0.8 мкм – пирен, фенантрен, флуорантен и бенз[b]флуорантен. На основе метода диагностических соотношений флуорантен/(флуорантен + пирен), равных более 0.4, в г. Иркутске источники ПАУ классифицируются как пирогенные (Tobiszewski and Namiesnik, 2012; Sun et al., 2023). На частицах 10 мкм при значениях соотношения 0.5-0.7 ПАУ адсорбированы из пирогенных источников, таких как теплоэлектростанции (ТЭЦ) и автотранспорт. На частицах 5.0 мкм, где соотношение составляло 0.3-0.8, обнаружены как пирогенные, так и петро-

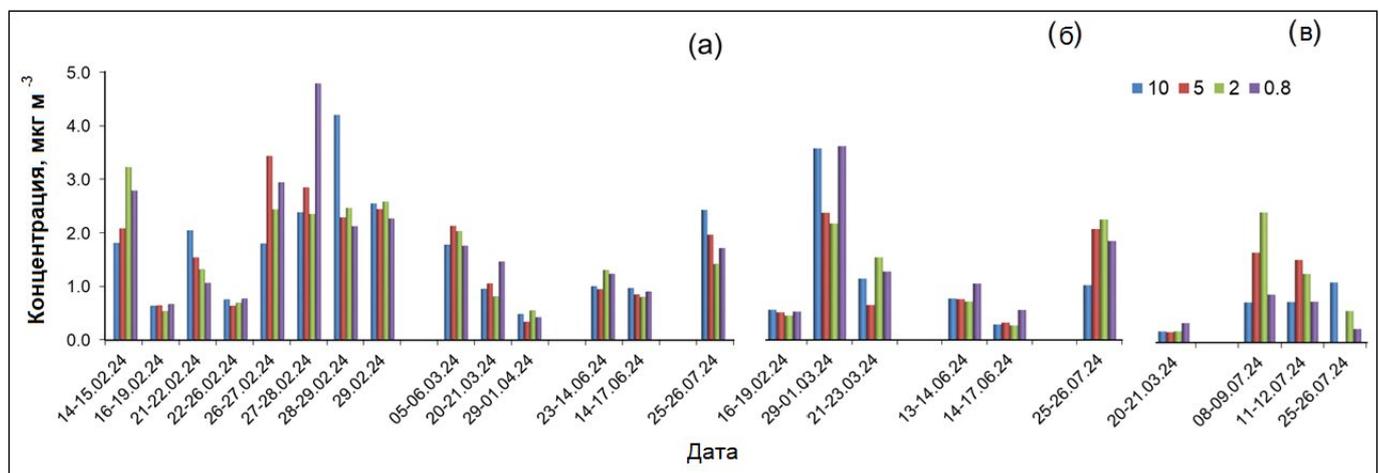


Рис.8. Среднесуточная изменчивость сажевых частиц в составе атмосферного аэрозоля разных размерных фракций аэрозоля на станциях Иркутск (а), Листвянка (б) стационаре Большие Коты (в) в 2024 г., мкг/м³.

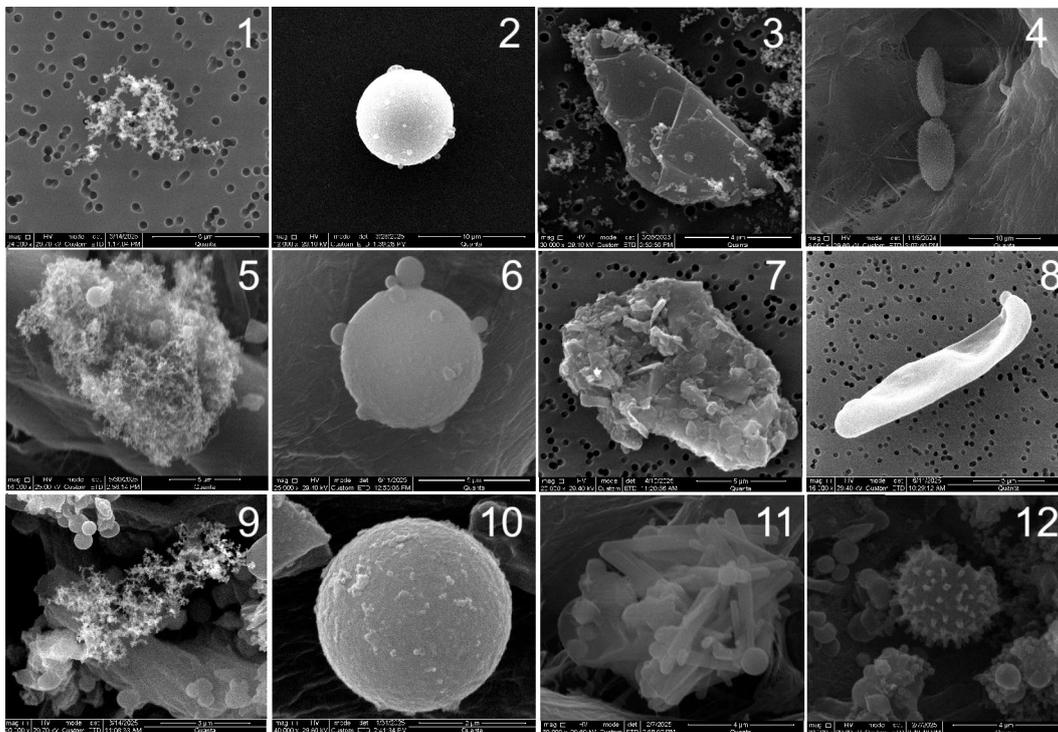


Рис.9. СЭМ-изображения частиц в приземном атмосферном аэрозоле на станциях Иркутск (позиции 1-4), Листвянка (позиции 5-8) и Большие Коты (позиции 9-12): сажевые частицы (позиции 1, 5, 9); летучая зола (позиции 2, 6, 10); минеральные частицы (позиции 3, 7, 11); биогенные частицы (позиции 4, 8, 12).

генные источники ПАУ. В мелких частицах размером 0.8 и 2.0 мкм (0.06-0.3) источники ПАУ связаны с природными процессами.

На станции Листвянка в холодный период (март) сумма ПАУ в аэрозоле варьировала в диапазоне от 0.2 нг/м³ на крупных частицах до 0.4 нг/м³ на мелких частицах 0.8 мкм. Сравнительный анализ данных по ст. Листвянка с аналогичными данными по станции Иркутск показал значительное превышение суммарных концентраций ПАУ в аэрозоле городской среды. Это превышение составило 1.9-2.3 раза для крупных частиц и достигло шестикратного уровня для мелких, что свидетельствует о более интенсивном загрязнении атмосферного воздуха в городской среде. Преобладающей группой ПАУ на ст. Листвянка были соединения с двумя кольцами (40%), тремя кольцами (34%) и четырьмя кольцами (22%). Доля соединений с пятью кольцами составила здесь только 2%. Из индивидуальных ПАУ на частицах 10 мкм доминировали фенантрен и нафталин, на частицах 2.0 мкм и 5.0 мкм – фенантрен, нафталин и 2-метилнафталин, на частицах 0.8 мкм – нафталин, фенантрен и флуорантен. Отношение флуорантен/(флуорантен + пирен), изменяющееся от 0.7 до 0.9 во всех фракциях, указывало на пирогенные источники ПАУ в аэрозоле Листвянки.

На станции Большие Коты средние значения суммы ПАУ в марте находились в том же диапазоне, что и на ст. Листвянка: от 0.2 до 0.3 нг/м³ в крупных частицах и около 0.7 нг/м³ на частицах 0.8 мкм. Преобладающей группой ПАУ в аэрозоле Больших Котов, в отличие от Иркутска и Листвянки, были соединения с тремя бензольными кольцами (39%). Вклад соединений с двумя кольцами составил 31%, с четырьмя – 24%. Характерно, что во всех размер-

ных фракциях содержались более тяжелые соединения с пятью бензольными кольцами, вклад которых составил от 5% до 8% при среднем значении 6%. При этом из индивидуальных ПАУ в этой фракции преобладали фенантрен, флуорантен и бенз[б]флуорантен. В размерной фракции до 10 мкм наибольшие концентрации определены для 2-метилнафталина, фенантрена и нафталина, во фракциях 5.0 и 2.0 мкм – флуорантена, нафталина и фенантрена. Пирогенные источники были преобладающими для соединений ПАУ в аэрозоле этой станции.

В летний период (июль-август) анализ ПАУ проводился только на ст. Иркутск. Уровень суммы ПАУ превышал показатели холодного периода, а средние значения увеличивались при уменьшении размера частиц: на частицах 10 мкм общая концентрация составляла около 0.8 нг/м³, на частицах 5.0 мкм – 0.9 нг/м³, на частицах 2.0 мкм – 1.0 нг/м³, 0.8 мкм – около 1.3 нг/м³. В аэрозоле преобладали соединения с двумя и тремя бензольными кольцами, доля которых составляла соответственно 41% и 31%. Соединения с четырьмя кольцами занимали около 22% от общего количества ПАУ. В июне соединения с пятью и шестью кольцами отсутствовали, однако в июле их доля на различных фракциях варьировала от 4% до 10%. В августе доля этих соединений значительно выросла и достигла до 39% на частицах размером 0.8 мкм. Данная динамика указывает на изменение источников и процессов формирования аэрозольных частиц в летний период, а также на увеличение присутствия более тяжелых ПАУ с большим числом бензольных колец в конце лета. Среди индивидуальных ПАУ в грубодисперсном аэрозоле преобладали нафталин, фенантрен и 2-метилнафталин, в субмикронных частицах наф-

талин, бенз[b]флуорантен и фенантрен. Согласно методу диагностических соотношений, источники соединений ПАУ, сорбированных на аэрозольных частицах в летний период были преимущественно пирогенными.

3.4. Морфология и элементный состав отдельных частиц

Проанализирована морфология и элементный состав отдельных частиц. Размеры отдельных частиц изменялись от десятков нанометров до десятков микрон. В холодный период в Иркутске преобладали частицы летучей золы и сажи, на станциях Листвянка и Большие Коты – частицы летучей золы, сажи и минеральные частицы. Сажевые агломераты чаще всего оседали на частицах размером менее 2.0 мкм и были одними из самых распространенных загрязнителей воздуха на станциях Иркутск и Листвянка (Рис. 9, позиции 1, 5, 9). Частицы летучей золы (Рис. 9, позиции 2, 6, 10), представляли собой алюмосиликатные сферы сгорания диаметром до 10 мкм. Элементный анализ летучей золы выявил значительное обогащение кислородом, алюминием и силикатами, а также присутствие углерода, железа, кальция и других элементов.

В теплый период года на всех станциях доминировали минеральные и биогенные частицы. Частицы минерального происхождения отличались неправильной формой и состояли из разнообразных силикатов и алюмосиликатов, содержащих примеси щелочных (калий, натрий), щелочноземельных (кальций, магний) и тяжелых металлов (железо, цинк, титан, медь, хром, марганец и другие). Биогенные частицы, в основном, представлены спорами грибов, пыльцой растений, брохосомами и другими биоаэрозолями.

4. Обсуждение

Анализ данных ионного состава разных фракций атмосферного аэрозоля показал, что сезонные характеристики, источники загрязнения и степень влияния других природных и антропогенных факторов значительно различаются на всех трех станциях. Иркутск более подвержен антропогенному воздействию из-за близости объектов теплоэнергетики, промышленных источников и транспорта большого города, в то время как Листвянка в большей степени испытывает влияние туристической деятельности (автомобильный, водный транспорт), региональный перенос загрязняющих примесей, лесных пожаров. Станция Большие Коты имеет меньшую степень загрязнения, благодаря удаленности от источников загрязнения и топографической особенности. Высокие значения концентрации ионов Ca^{2+} , NO_3^- и SO_4^{2-} в разных размерных фракциях частиц, особенно при северо-западном переносе, характерны для станций Иркутск и Листвянка в феврале. В Иркутске в зимний период на крупных частицах наблюдаются повышенные концентрации ионов Na^+ и Cl^- . Их увеличение в атмосфере связано с накопле-

нием реагентов в снеге при обработке дорожного покрытия для предотвращения обледенения. В летний период на ст. Иркутск отмечались заносы примесей из отдельных районов Монголии, Казахстана и Республики Тыва. На станции Листвянка более значимо отмечено влияние лесных пожаров на состав аэрозоля, что проявилось в повышении концентрации ионов Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} и K^+ . На станции Большие Коты наблюдается самое низкое содержание ионов в составе отдельных фракций аэрозоля в холодный период, хотя летом под воздействием локальных источников (лесные пожары, водный транспорт), фиксируется рост концентраций ионов NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} .

В микроэлементном составе аэрозоля в г. Иркутске суммарная концентрация микроэлементов в среднем в 4-8 раз выше, чем в Листвянке и Больших Котах. В сезонной динамике распределения суммы микроэлементов в аэрозоле Иркутска наблюдалось их увеличение в весенний и летний периоды. В аэрозоле Листвянки максимальные значения суммы микроэлементов, как и макрокомпонентов, фиксировались в феврале, при этом наибольшие концентрации определялись на мелких частицах размером 0.8 и 2.0 мкм. Наименьшие концентрации микроэлементов регистрировались на станции Большие Коты. Анализ коэффициентов обогащения аэрозольных частиц микроэлементами на всех станциях позволил выделить элементы Be, Al, Ti, V, Mn, Fe, Co, Sr, Ba, Th и U в группу терригенного происхождения с коэффициентом обогащения (КО) менее 10. На станции Иркутск наиболее значительный вклад в общий уровень загрязнения внесли Fe, Mn, Al, Cu, Ba, Ni, Zn, Pb, Se, Co; доля Fe варьировала от 56% до 75% в холодный период и от 78% до 94% летом. На станции Листвянка преобладали элементы Fe, Cu, Mn, Ni, Al, Mn, Zn, Se, Co и с максимальной долей Fe до 92% в теплый период года. На станции Большие Коты наибольший вклад вносили элементы Fe, Cu, Ni и Mn с долей Fe до 80% в холодный период года.

Высокие значения концентрации сажи (черного углерода и других органических соединений) в холодный период года характерны для станций Иркутск и Листвянка. На станции Большие Коты повышение уровня концентрации черного углерода отмечалось в летний период. Углеродсодержащие частицы способны сорбировать различные химические соединения.

Сжигание угля, нефти и древесины, выбросы от автомобилей и промышленных предприятий являются источниками ПАУ. Эти соединения обладают высокой устойчивостью к разложению в окружающей среде, конденсируются на частицах аэрозолей и оседают на подстилающей поверхности. В аэрозолях на станциях мониторинга преобладающий вклад ПАУ с двумя-тремя кольцами составлял от 29% до 41%, в то время как ПАУ с четырьмя-шестью кольцами имели меньший вклад, в среднем от 2% до 9%. Отмечалось, что в аэрозоле Иркутска, собранном в феврале 2024 года, доля ПАУ с четырьмя кольцами увеличивалась с 16% до 43%.

Среди идентифицированных ПАУ наиболее часто встречался фенантрен, который присутствует как в природных ископаемых углеводородах, так и образуется при термическом разложении органических материалов. Другими часто доминирующими соединениями были нафталин и 2-метилнафталин. Их концентрации связаны с выбросами от транспорта при неполном сгорании топлива и выбросами стационарных источников.

Размеры отдельных аэрозольных частиц при анализе на сканирующем электронном микроскопе изменялись от десятков нанометров до десятков микрон. В исследуемых образцах присутствовали сажа, летучая зола, минеральные частицы и биоаэрозоли. В холодный период доминировали частицы сажи и золы, в теплый преобладали щелочноземельных металлов с включением и тяжёлых металлов, биогенные аэрозоли. Присутствие минеральных частиц в атмосферном аэрозоле обусловлено, преимущественно, терригенным происхождением.

5. Выводы

Впервые проведен комплексный анализ химического состава атмосферного аэрозоля разных размерных фракций, собранного в разные сезоны 2024 года на станциях Листвянка (сельская), Большие Коты (фоновая) в Центральной экологической зоне и станции Иркутск (городская) в Зоне атмосферного влияния Южного Байкала. Установлены сезонные и пространственные различия в составе аэрозольных частиц разных размерных фракций на станциях мониторинга, обусловленные сочетанием природных и антропогенных факторов, включая промышленное воздействие, лесные пожары и транспорт. В зимний период на станциях Иркутск и Листвянка определены самые высокие концентрации ионов Ca^{2+} , NO_3^- и SO_4^{2-} во всех фракциях аэрозольных частиц, особенно их рост отмечался при северо-западном переносе с промышленных территорий Красноярского края и Иркутской области. В г. Иркутске, кроме того, на крупных частицах наблюдались повышенные концентрации ионов Na^+ и Cl^- , а летом определялись заносы примесей из районов Монголии, Казахстана и Республики Тыва, что подтверждалось обратными траекториями движения воздушных масс на высотах 500, 1000, 1500 м.

Влияние лесных пожаров на состав аэрозоля, особенно проявилось на станции Листвянка, где во время дымовых заносов увеличивались концентрации ионов Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} и K^+ .

На станции Большие Коты зимой определены самые низкие концентрации всех анализируемых ионов, что подтвердило эту станцию как фоновую, где практически не фиксировались локальные и региональные источники загрязняющих примесей. В летний период под воздействием лесных пожаров и водного транспорта на этой станции наблюдался небольшой рост в аэрозольных частицах концентраций ионов NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} .

Большинство микроэлементов (Be, Al, Ti, V, Mn, Fe, Co, Sr, Ba, Th, U) в аэрозоле на исследуе-

мых территориях имели природное происхождение. Значительное техногенное обогащение демонстрировали элементы B, Cu, Se, Cd, Sn, Ag, которые являлись наиболее выраженными загрязнителями воздуха с коэффициентами обогащения (КО) более 1000. В сезонной динамике на ст. Иркутск наблюдалось увеличение суммы микроэлементов в весенний и летний периоды. На станции Листвянка сезонные максимумы микроэлементов смещены на осенний (октябрь) и зимний (декабрь, февраль) периоды. Летом на станции Большие Коты распределение концентраций микроэлементов в аэрозольных частицах схожее с Листвянкой: водный транспорт и лесные пожары оказывали существенное влияние на их состав в этот период.

Высокие значения концентрации сажи (черного углерода), стойких органических соединений (ПАУ) в холодный период года характерны для станций Иркутск и Листвянка.

На станции Большие Коты повышение уровня концентраций черного углерода отмечалось в летний период. Анализ состава ПАУ выявил преобладание соединений с двумя-тремя бензольными кольцами, а соотношения диагностических показателей указывали на их пирогенные источники. В летний период наблюдалось увеличение содержания более тяжелых ПАУ с большим числом колец, что свидетельствовало о смене источников в процессе формирования аэрозолей.

Исследование морфологии частиц методом сканирующей электронной микроскопии и показало, что основными их компонентами в исследуемых районах были сажа, летучая зола в зимний период, минеральные частицы и биоаэрозоли летом. Присутствие минеральных частиц в атмосферном аэрозоле обусловлено, преимущественно, терригенным происхождением.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта государственного задания: № 0279-2021-0014 при анализе состава аэрозольных частиц и гранта РФФИ №19-77-20058П при статистической обработке полученных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Белозерова О.Ю., Егоров В.И., Чебыкин А.П. и др. 2019. Применение методов электронной микроскопии, массспектрометрии и рентгеноспектрального электроннозондового микроанализа в эколого-аналитических исследованиях. элементный состав синих микрочастиц неизвестной природы, наблюдаемых во взвешенном веществе озера Байкал. Известия байкальского государственного университета 29(4): 533-544. DOI: [10.17150/2500-2759.2019.29\(4\).533-544](https://doi.org/10.17150/2500-2759.2019.29(4).533-544)

- Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Громов С.А. и др. 2025. Многолетние исследования химического состава атмосферного аэрозоля на станциях сети ЕАНЕТ в Российской Федерации. *Оптика атмосферы и океана* 38(6): 422-431. DOI: [10.15372/AOO20250602](https://doi.org/10.15372/AOO20250602)
- Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Стариков А.В. и др. 2012. Химический состав аэрозолей в атмосфере Монголии. *Метеорология и гидрология* 8: 59-68.
- Маринайте И.И., Ходжер Т.В., Оболкин В.А. и др. 2023. Полициклические ароматические углеводороды PM₁₀, PM_{2,5}, PM_{1,0} в атмосфере Южного Прибайкалья. *Метеорология и гидрология* 48(4): 300-308. DOI: [10.3103/S1068373923040027](https://doi.org/10.3103/S1068373923040027)
- Приказ Министерства природных ресурсов и экологии РФ от 17 февраля 2022 г. N 106 «Об утверждении методики определения высокого и очень высокого загрязнения атмосферного воздуха» [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/403588206> (дата обращения: 09.04.2025).
- Щербов Б.Л., Журкова И. 2014. С. Лесные пожары – важный фактор рассеяния и концентрирования химических элементов в ландшафтах Сибири. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири* S3-2: 37-40.
- Anenberg S.C., Belova A., Brandt J. et al. 2016. Survey of Ambient Air Pollution Health Risk Assessment Tools. *Risk Analysis* 36(9): 1718-1736. DOI: [10.1111/risa.12540](https://doi.org/10.1111/risa.12540)
- ARL NOAA Atmospheric Resource Laboratory NOAA. URL: <http://www.arl.noaa.gov> (last accessed: 07.05.2025).
- Fiedler V., Nau R., Ludmann S. et al. 2009. East Asian SO₂ pollution plume over Europe – Part 1: Airborne trace gas measurements and source identification by particle dispersion model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9: 4717-4728. DOI: [10.5194/acp-9-4717-2009](https://doi.org/10.5194/acp-9-4717-2009)
- Golobokova L., Netsvetaeva O., Khodzher T. et al. 2021. Atmospheric Deposition on the Southwest Coast of the Southern Basin of Lake Baikal. *Atmosphere* 12(10): 1230. DOI: [10.3390/atmos12101357](https://doi.org/10.3390/atmos12101357)
- Golobokova L.P., Khodzher T.V., Obolkin V.A. et al. 2025. Physical and Chemical Characteristics of Different Aerosol Fractions in the Southern Baikal Region (Russia) During the Warm Season. *Atmosphere* 16(7): 829. DOI: [10.3390/atmos16070829](https://doi.org/10.3390/atmos16070829)
- Gorshkov A.G., Izosimova O.N., Kustova O.V. et al. 2021. Wildfires as a Source of PAHs in Surface Waters of Background Areas (Lake Baikal, Russia). *Water* 13(19): 1-16. DOI: [10.3390/w13192636](https://doi.org/10.3390/w13192636)
- Grennfelt P., Englerud A., Forsius M. et al. 2020. Acid rain and air pollution: 50 years of progress in environmental science and policy. *Ambio* 49: 849–864. DOI: [10.1007/s13280-019-01244-4](https://doi.org/10.1007/s13280-019-01244-4)
- Ionel I., Makra L., Csépe Z. et al. 2018. Assessment of relationship between meteorological elements and air pollutants load in an urban environment. *Journal of Environmental Protection and Ecology* 4: 1462-1471.
- Karagulian F., Belis C.A., Dora C. et al. 2015. Contributions to cities ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level. *Atmospheric Environment* 120: 475-483. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2015.08.087](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.087)
- Khodzher T.V., Golobokova L.P., Obolkin V.A. 2020. Chemical composition of aerosol and gas impurities in the Baikal region during wildfires in the summer of 2018-2019. *Proceedings of SPIE* 11560: 1-7. DOI: [10.1117/12.2575424](https://doi.org/10.1117/12.2575424)
- Khodzher T.V., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S. et al. 2019. Ship-Based Studies of Aerosol-Gas Admixtures over Lake Baikal Basin in Summer 2018. *Optika atmosfery i okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]* 32(4): 434-441. DOI: [10.1134/S1024856019040067](https://doi.org/10.1134/S1024856019040067)
- Manousakas M., Popovicheva O., Evangelidou N. 2020. Aerosol carbonaceous, elemental and ionic composition variability and origin at the Siberian High Arctic, Cape Baranova. *Tellus. Series B: Chemical and Physical Meteorology* 72: 1-14. DOI: [10.1080/16000889.2020.1803708](https://doi.org/10.1080/16000889.2020.1803708)
- 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. DOI: [10.1080/00207233.2016](https://doi.org/10.1080/00207233.2016)
- Obolkin V., Molozhnikova E., Shikhovtsev M. 2021. Sulfur and Nitrogen Oxides in the Atmosphere of Lake Baikal: Sources, Automatic Monitoring, and Environmental Risks. *Atmosphere* 12(10): 1-10. DOI: [10.3390/atmos12101348](https://doi.org/10.3390/atmos12101348)
- Pogodaeva T.V., Lopatina I.N., Bashenkhaeva N.V. et al. 2020. Benthic dissolved organic carbon fluxes and distribution in Lake Baikal sediments. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 879-881. DOI: [10.31951/2658-3518-2020-A-4-879](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-A-4-879)
- Reid J., Koppmann R., Eck T. et al. 2005. A review of biomass burning emissions. Part 2: Intensive physical properties of biomass burning particles. *Atmospheric Chemistry and Physics* 5: 799–825. DOI: [10.5194/acp-5-799-2005](https://doi.org/10.5194/acp-5-799-2005)
- Rudnick R.L., Gao S. 2014. Composition of the continental crust. In *Treatise on Geochemistry*. Elsevier: Amsterdam. The Netherlands 4: 1-51. DOI: [10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00301-6)
- Schlosser J.S., Braun R.A., Bradley T. et al. 2017. Analysis of aerosol composition data for western United States wildfires between 2005 and 2015: Dust emissions, chloride depletion, and most enhanced aerosol constituents. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122(16): 8951–8966. DOI: [10.1002/2017JD026547](https://doi.org/10.1002/2017JD026547)
- Sun L., Ai X., Yao X. et al. 2023. Relationship between atmospheric pollution and polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh snow during heavy pollution episodes in a cold city, northeast China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 260: 1-10. DOI: [10.1016/j.ecoenv.2023.115091](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115091)
- Tobiszewski M., Namiesnik J. 2012. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources. *Environmental Pollution* 162: 110-119. DOI: [10.1016/j.envpol.2011.10.025](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.10.025)
- EPA Report U.S. EPA-450/R-12-001. 2012. U.S. Environmental Protection Agency, Washington: D.C.
- Yue X.L., Gao Q.X. 2018. Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions. *Advances in Climate Change Research* 9(4): 243-252. DOI: [10.1016/j.accre.2018.12.003](https://doi.org/10.1016/j.accre.2018.12.003)