

Results of expedition measurements of PM₁₀, PAHs and mercury above the water area of Lake Baikal in August 2023

Original Article

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYMarinaite I.I.*^{ORCID}, Khodzher T.V.^{ORCID}, Shikhovtsev M.Yu.^{ORCID}, Lutskin E.S., Potemkin V.L.^{ORCID}

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

ABSTRACT. As a continuation of regular research to obtain information about mechanisms and sources of air pollution above the water area of Lake Baikal, we present the results of the expeditionary studies on the concentrations of PM₁₀, polycyclic aromatic hydrocarbons and gaseous elemental mercury in the near-water layer of the atmosphere above Lake Baikal in August 2023. On the route of the vessel along the perimeter of the lake, the concentrations of pollutants in the near-water atmosphere increased near the local sources of air pollution located on the coast of the southern basin (Listvyanka, Slyudyanka and Baikalsk) as well as at the source of the Angara River with the northwesterly transport from the industrial cities of the Baikal region. Over the study period, the PM₁₀ concentrations averaged 6.0 µg/m³, PAHs–1.1 ng/m³, and gaseous elemental mercury–0.75 ng/m³, which was lower than the values recorded during wildfires between 2016 and 2020 in some areas of Siberia. The resulting concentrations of the investigated air components did not exceed air quality standards. Pairwise correlations during the study period were high between PM₁₀ and PAHs (0.71) and low between PAHs and mercury (0.21).

Keywords: air pollution, PM₁₀ particles, PAHs, mercury, Lake Baikal

For citation: Marinaite I.I., Khodzher T.V., Shikhovtsev M.Yu., Lutskin E.S., Potemkin V.L. Results of expedition measurements of PM₁₀, PAHs and mercury above the water area of Lake Baikal in August 2023 // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 3. - P. 171-180. DOI: 10.31951/2658-3518-2024-A-3-171

1. Introduction

Monitoring of such air pollutants as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and gaseous elemental mercury (GEM) is mandatory due to their carcinogenic and toxic hazards for the environment and human health (Kaleta and Kozielska, 2023). The combustion of coal, oil and wood are the primary anthropogenic sources of their release into the atmosphere (Marinaite et al., 2023; Tripathee et al., 2019). From the atmosphere, pollutants enter the underlying surface through wet (precipitation and fog) and dry (gases and particles) deposition. Over the past decade, researchers have been intensively studying climate change and air pollution from industrial enterprises in the Baikal region and local sources of air pollution on the coast of Lake Baikal. Observations of the atmosphere above Lake Baikal during large wildfires in the Baikal region, Krasnoyarsk Territory and Yakutia between 2016 and 2020 revealed the increase in the content of aerosol particles and gaseous impurities (Khodzher et al., 2019; Zhamsueva et al., 2022), total PAH concentration (Marinaite et al.,

2018) and gaseous mercury (Mashyanov et al., 2021) in the air above the water area and the coast of the lake. These toxic substances are deposited onto the water area of the lake, polluting its water (Gorchkov et al., 2021). Control of air pollutants above Lake Baikal is among the priorities in its water quality monitoring.

2. Materials and methods

To assess the contribution of anthropogenic sources of air pollution in the Baikal region and hazardous natural phenomena (wildfires) to air pollution above Lake Baikal, continuous measurements of number and mass concentrations of aerosol particles and GEM were carried out from the board on the research vessel (RV) “G.Yu. Vereshchagin” from 5 to 15 August 2023. 25 aerosol samples were taken and analysed for PAHs. The expedition route ran along the entire perimeter of Lake Baikal with stops in areas having large local sources of air pollution on the lake’s coast and in estuarine areas of large tributaries and bays (Fig. 1).

*Corresponding author.

E-mail address: marin@lin.irk.ru (I.I. Marinaite)

Received: May 13, 2024; **Accepted:** June 03, 2024;

Available online: June 19, 2024

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



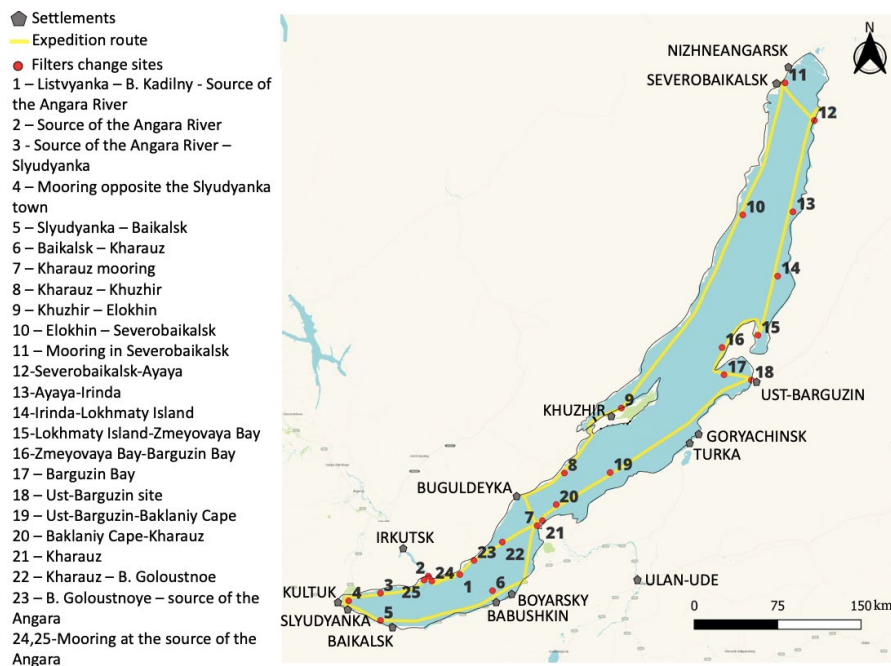


Fig.1. Schematic map of the RV "G.Yu. Vereshchagin" route throughout the water area of Lake Baikal (5–15 August 2023).

To study number concentration and particle size distribution, a Handheld 3016 IAQ particle counter (Lighthouse, USA) was used, allowing continuous measurements of particle sizes in six channels (0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, and 10.0 μm) with averaging over 5 minutes. GEM was measured with a Lumex PA-915M portable automatic mercury analyzer (Russia). The aerosol composition for 21 PAH components was analysed via gas chromatography with mass spectrometric detection on a GC/MS Triple Quad 7000C instrument with GC System 7890B (Agilent Technologies, USA).

3. Results and discussion

Unlike expeditions during wildfires (2018–2020), in 2023, we observed no smoke aerosol in the air above the lake despite fires in Yakutia at the end of summer. The total particulate matter (TPM) ranged from 1 to 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, with the maximum of 10–12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, which was up to 10 times higher than the background values. In the central basin of Lake Baikal, the concentration ranged from 3 to 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and in the northern basin–1 to 2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Overall, the concentrations obtained throughout the water area of the lake did not exceed the average daily MPC (60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) for the environmental air and were comparable with the 2022 data.

The dynamics of the number concentration of aerosol particles showed the changes both in the medium aerosol fraction with a size of up to 1.0 μm and in a coarse fraction of up to 10 μm . During the expedition, there were several episodes of an increase in the concentration of medium fraction particles ($\text{PM}_{10} < 1 \mu\text{m}$). On the route, the medium fraction ($\text{PM}_{10} < 1 \mu\text{m}$) was 62% (Fig. 3, sample 14) at the background site along the east coast (the middle of the route from Ayaya Bay to Lokhmaty Island). At the estuary of the Kharauz River, during the transition from the east coast of the west coast (the Kharauz estuary–Bolshoye

Goloustnoye), the concentration of the medium fraction reached 65% (samples 21–23) due to the cyclone above Lake Baikal during that period. As we approached local sources of air pollution in the southern basin, the number of the medium aerosol fraction decreased dramatically from 43% to 27% (samples 2–3) and down to 24% in the central basin near the Ust-Barguzin settlement (Fig. 3, sample 15).

The resulting dynamics of the concentration distribution of the total PAHs corresponded to the dynamics of the aerosol particle concentration above the water area of Lake Baikal (Fig. 2), which the close correlations between them confirmed (Table 1) and indicated similar sources of their origin. There was practically no correlation between the concentration of gaseous mercury and the concentrations of PAHs and PM_{10} (Table 1).

During the study period, the total PAH concentration in the near-water atmosphere varied from 0.008 to 8.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mean value $1.1 \pm 2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), with the highest values in the southern basin (6.3–8.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

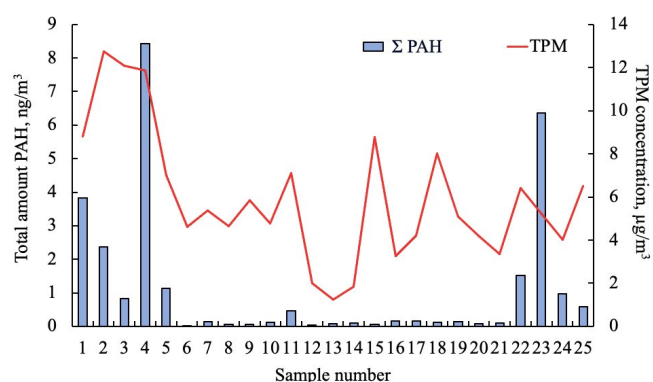


Fig.2. TPM ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) averaged for each sample and the total amount of 21 PAHs (ng/m^3) in the air above the water area of Lake Baikal (5–15 August 2023).

Table 1. Pair correlation coefficients between the total PAH concentration, mass concentration of aerosol particles with different size fractions and mercury above the surface of Lake Baikal

	PAHs	TPM	PM ₁ < 1 μm	PM ₁₀ > 1 μm	Mercury
PAHs	1.00				
TPM	0.49	1.00			
PM ₁ < 1 μm	0.71	0.79	1.00		
PM ₁₀ > 1 μm	0.32	0.96	0.58	1.00	
Mercury	0.21	0.23	0.48	0.09	1.00

Note: TPM–total particulate matter; PM₁ < 1 μm–medium aerosol fraction with particle size less than 1 μm; PM₁₀ > 1 μm–coarse aerosol fraction with particle size of up to 10 μm (Ivlev and Dovgolyuk, 1999).

In the central basin, it varied from 0.050 to 1.5 μg/m³, and in the northern basin—from 0.045 to 0.46 μg/m³. The data obtained during the 2023 expedition appeared to be lower than the concentrations during wildfires on the lake's coast in 2016 (0.22–133 μg/m³, mean 5.9 ± 22.6 μg/m³), close to the values above the water area of the lake recorded in 2019 (0.11–4.6 μg/m³, mean 0.96 ± 1.0 μg/m³) but higher than the PAH concentrations in 2020 (0.07–2.5 μg/m³, mean 0.4 ± 0.5 μg/m³).

In the southern basin, the elevated PAH concentrations, up to 180 times higher than the background values, were observed along the west coast towards Kadilny–Listvyanka–the Angara River source (up to 3.7 μg/m³, samples 1–2, Fig. 2) as well as during moorings near the towns of Slyudyanka (up to 8.4 μg/m³, sample 4) and Baikalsk (up to 1.1 μg/m³, sample 5) under calm weather and aerosol transport from local sources of air pollution on the coast. Along the east coast and then along the west coast from the southern basin to the central basin and further to the northern basin (Boyarsk settlement–Kharauz estuary–Olkhon Island–Elokhin Cape–Severobaikalsk town), the total PAH concentration in the aerosol was low (0.05 μg/m³) with a gradual increase (up to 0.12 μg/m³, Fig. 2) near the town of Severobaikalsk. Almost all that time, there was low cloudiness in the atmosphere accompanied by periodical precipitation, leading to a clearing of the air. In the northern basin, we recorded high total PAH concentrations near Severobaikalsk (0.46 μg/m³, sample 11) presumably due to emissions of combustion products from the local thermal power plant. When the RV moved along the east coast from the background areas of the northern basin (Ayaya Bay–Khakusy–Chivyrkuy Bay), the total PAH concentration was low (0.045–0.16 μg/m³, samples 12–19). The meteorological conditions at that time were characterised by the presence of small inversions, low cloudiness and periodical precipitation, leading to a clearing of the air. The concentrations of pollutants decreased in the central basin during the transition from Baklaniy Cape to the Kharauz estuary (0.07–0.09 μg/m³, samples 20–21). During the transition from the east coast to the west coast along the Kharauz estuary–Bolshoye Goloustnoye route and further along the west coast to the southern basin (Cadilny Cape–Bolshiye Koty–Listvyanka), the PAH concentration increased from 1.5 to 6.4 μg/m³ (samples 21–23, Fig. 2). We also recorded its growth in the Angara River source (0.97 μg/m³, samples 24–25). The concentration of benzo[a]pyrene standardised in Russia ranged from

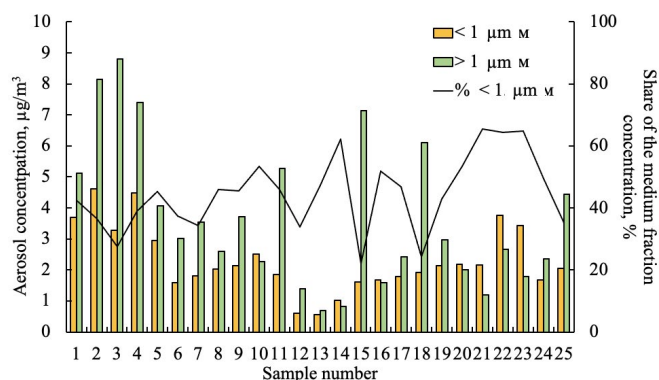


Fig.3. Mass concentration variability (μg/m³) of the medium (PM₁ < 1 μm) and coarse (PM₁₀ from 1 μm to 10 μm) aerosol fractions and the share (%) of the medium fraction in the total aerosol of the near-water atmosphere above Lake Baikal (5-15 August 2023).

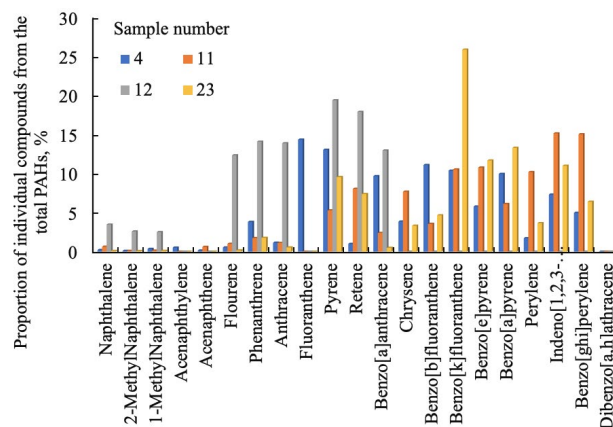


Fig.4. Proportion (%) of individual compounds from the total PAH concentration in aerosol samples 4, 11, 12, and 23 above the surface of Lake Baikal (5-15 August 2023).

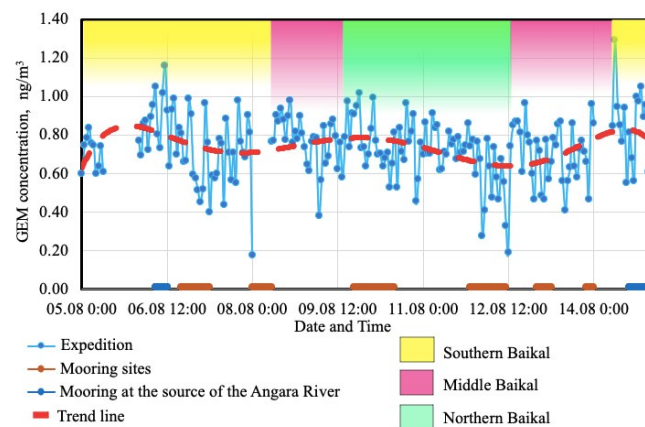


Fig.5. Variability of the GEM concentrations (ng/m³) in the air above the water surface in the southern, central and northern basins of Lake Baikal (5-15 August 2023).

0.001 to 0.84 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mean $0.09 \pm 0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) above the entire water area of Lake Baikal and did not exceed MPC ($1 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

The composition of individual PAHs sampled from various areas above the lake surface was different (Fig. 4). Among 21 detected PAHs, the proportion of the major compounds decreased in the following sequence: pyrene (11.8%) > benzo[k]fluoranthene (11.7%) > indeno[1,2,3-c,d]pyrene (8.3%) > benzo[e]pyrene (7%), benzo[a]pyrene (7%). A group of PAHs with four, five or six benzene rings predominated in the aerosol samples near local sources of air pollution in the southern basin (samples 4, 11 and 23), with their proportion of up to 84% from the total mass. This indicates the pyrogenic nature of the air pollution sources during combustion of coal, wood and liquid fuels (Othman et al., 2022). In sample 12, along the Severobaikalsk town–Ayaya Bay route, the amount of retene (biomass combustion component) reached 18% of the total mass of detected compounds.

We estimated PAH fluxes from the atmosphere to the surface of the lake. To determine them, we used a particle sedimentation rate of 0.02 m/s adopted in (Duce and Neil, 1991). Like in case of the concentrations, we identified the maximum PAH fluxes near the local air pollution sources along the west (Listvyanka settlement and the Angara source) and east (Slyudyanka town) coasts of the southern basin ($1.7\text{--}102 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{week}$). In the central basin, PAH fluxes amounted to $0.6\text{--}1.7 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{week}$, and in the northern basin– $0.5\text{--}5.6 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{week}$ with an elevated value near Severobaikalsk. The results turned out to be 15 times lower than the fluxes calculated for the Buguldeika area during wildfires in the summer of 2016 ($490\text{--}1600 \mu\text{g}/\text{m}^2/\text{week}$) (Marinaite et al., 2018).

The GEM concentration above the lake varied from 0.18 to 1.29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The highest values were in the southern basin ($0.4\text{--}1.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mean $0.76 \pm 0.19 \mu\text{g}/\text{m}^3$). In the central basin, it ranged from 0.18 to 1.07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mean $0.73 \pm 0.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$), and in the northern basin–from 0.19 to 1.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mean $0.72 \pm 0.12 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Therefore, during the 2023 expedition, average GEM concentrations above the lake varied insignificantly and appeared to be lower than the average value of 1.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Mashyanov et al., 2021) analysed above the lake in July 2018 during smog from wildfires. No significant anomalies in the mercury concentrations in the air above the lake were observed during the expedition. Some increase in its concentration in the southern basins can be explained by the transport from the local air pollution sources, such as boiler houses and thermal power plants located in the settlements on the coast, as well as by the transport of pollutants from large thermal power plants located in the cities of the Baikal region along the valley of the Angara River (Fig. 5). Mercury degassing through deep fault zones may be a potential natural source of mercury emissions into the air because Lake Baikal is situated within the seismically active Baikal Rift Zone. The literature provides the data on a slight increase in the mercury concentration up to 1.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ above gas hydrate deposits and oil seepages onto the lake sur-

face (Mashyanov et al., 2021), although unambiguous evidence of a connection between airborne mercury anomalies and tectonic structures has not been found. The mean mercury concentration of $0.74 \pm 0.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ recorded above Lake Baikal during the expedition was two times lower than the mean value of $1.6 \pm 0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ recorded at the coastal monitoring station on the west coast of the southern basin in the Listvyanka settlement on the same days of observations (Lutskin et al., 2023) and can be explained by its deposition from the atmosphere during moisture condensation above the water surface.

4. Conclusion

During the expedition onboard the RV “G.Yu. Vereshchagin” from 5 to 15 August 2023, we revealed a spatiotemporal pattern of pollutant distribution (PM_{10} , PAHs and GEM) in the air above the water area of Lake Baikal and estimated fluxes of pollutants onto the water surface of the lake. A 180-fold increase in the concentrations in comparison with the background values for PAHs and a 10-fold increase of PM_{10} determined in clean areas of the lake were observed in the southern basin near the settlements (Listvyanka, Slyudyanka and Baikalsk) under calm weather conditions and at the source of the Angara River with northwesterly wind. At the same time, the concentrations of benzo[a]pyrene and aerosol particles did not exceed air quality standards. The concentration of the total PAHs and the medium ($\text{PM}_1 < 1 \mu\text{m}$) and coarse (PM_{10} from 1 to 10 μm) aerosol fractions showed a positive correlation, indicating a similar location of their sources. PAH fluxes onto the water surface of the lake were 15 times lower than the values obtained during the fire danger period of 2016. The mean mercury concentration in the air above the lake ($0.74 \pm 0.17 \mu\text{g}/\text{m}^3$) was lower than the coastal values obtained at the monitoring station in the Listvyanka settlement ($1.6 \pm 0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

5. Acknowledgments

This study was supported by the Russian Science Foundation (19–77–20058 P). Chemical analysis of PAHs was carried out using the equipment of the Collective Instrumental Center “Ultramicroanalysis” at Limnological Institute SB RAS.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Duce R.A., Neil W.T. 1991. Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean. *Limnology and Oceanography* 36(8): 1715-1726. DOI: [10.4319/lo.1991.36.8.1715](https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.8.1715)
- Gorchkov 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(2636): 1-16. DOI: [10.3390/w13192636](https://doi.org/10.3390/w13192636)

Ivlev L.S., Dovgolyuk Yu.A. 1999. Physics of atmospheric aerosol systems. St. Petersburg: NIIKH St. Petersburg State University. (in Russian).

Kaleta D., Kozielska B. 2023. Spatial and Temporal Volatility of PM_{2.5}, PM₁₀ and PM₁₀-Bound B[a]P Concentrations and Assessment of the Exposure of the Population of Silesia in 2018–2021. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20(1): 138. DOI: [10.3390/ijerph20010138](https://doi.org/10.3390/ijerph20010138)

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. *Atmospheric and Oceanic Optics* 32 (4): 434–441. DOI: [10.1134/S1024856019040067](https://doi.org/10.1134/S1024856019040067)

Lutskin E.S., Shikhovtsev M.Yu., Molozhnikova E.V. et al. 2023. Mercury in the air and precipitation in 2022-2023 at the Listvyanka station (Southern Baikal region). In: XXX working group “Aerosols of Siberia”, pp. 21-22.

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)

Marinaite I.I., Molozhnikova E.V., Khodzher T.V. 2018. PAHs transfer and intake to the water area of Lake Baikal

during the summer forest fires in 2016. *Proceedings of SPIE*. 1083374. DOI: [10.1117/12.2502818](https://doi.org/10.1117/12.2502818)

Mashyanov N., Obolkin V., Pogarev S. et al. 2021. Air mercury monitoring at the Baikal area. *Atmosphere* 12(7): 807. DOI: [10.3390/atmos12070807](https://doi.org/10.3390/atmos12070807)

Othman N., Ismail Z., Selamat M. et al. 2022. A Review of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Pollution in the Air: Where and How Much Are We Exposed to? *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19(21): 13923. DOI: [10.3390/ijerph192113923](https://doi.org/10.3390/ijerph192113923)

Tripathee L., Guo J., Kang S. et al. 2019. Spatial and temporal distribution of total mercury in atmospheric wet precipitation at four sites from the Nepal-Himalayas. *Science of the Total Environment* 655: 1207-1217. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.11.338](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.338)

Zhamsueva G., Zayakhanov A., Khodzher T. et al. 2022. Studies of the dispersed composition of atmospheric aerosol and its relationship with small gas impurities in the near-water layer of Lake Baikal based on the results of ship measurements in the summer of 2020. *Atmosphere* 13(1): 139. DOI: [10.3390/atmos13010139](https://doi.org/10.3390/atmos13010139)

Результаты экспедиционных измерений PM_{10} , ПАУ и ртути над поверхностью оз. Байкал в августе 2023 года



Маринайте И.И.*^{ORCID}, Ходжер Т.В.^{ORCID}, Шиховцев М.Ю.^{ORCID}, Луцкин Е.С., Потёмкин В.Л.^{ORCID}

Лимнологический институт, Сибирское отделение Российской академии наук, Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

АННОТАЦИЯ. В продолжение регулярных исследований, проводимых с целью получения информации о механизмах и источниках загрязнения атмосферы над акваторией оз. Байкал, представлены результаты экспедиционных исследований содержания PM_{10} , ПАУ и газообразной элементарной ртути в приводном слое атмосферы озера Байкал в августе 2023 г. На маршруте следования судна по периметру озера наблюдалось увеличение концентрации загрязняющих веществ в приводной атмосфере вблизи локальных источников загрязнения, расположенных на побережье Южного Байкала (п. Листвянка, гг. Слюдянка, Байкальск), и в истоке Ангары при северо-западном переносе от промышленных городов региона. За период исследования концентрации PM_{10} составили, в среднем, 6.0 мкг/м^3 , ПАУ – 1.1 нг/м^3 , газообразной элементарной ртути – 0.75 нг/м^3 , что было ниже результатов, обнаруженных при пожарах 2016–2020 гг. в отдельных районах Сибири. Полученные концентрации исследуемых компонентов атмосферы не превышали стандарты качества воздуха. Значение коэффициентов парной корреляции за период исследования было высоким между PM_{10} и ПАУ – 0.71, низким между ПАУ и ртутью – 0.21.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы, частицы PM_{10} , ПАУ, ртуть, Байкал

Для цитирования: Маринайте И.И., Ходжер Т.В., Шиховцев М.Ю., Луцкин Е.С., Потёмкин В.Л. Результаты экспедиционных измерений PM_{10} , ПАУ и ртути над поверхностью оз. Байкал в августе 2023 года // Limnology and Freshwater Biology. 2024. - № 3. - С. 171-180. DOI: [10.31951/2658-3518-2024-A-3-171](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-3-171)

1. Введение

Мониторинг таких микропримесей, как полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и газообразная элементарная ртуть в атмосферном воздухе, является обязательным вследствие их канцерогенной и токсической опасности для окружающей среды и здоровья человека (Kaleta and Kozielska, 2023). К антропогенным источникам поступления их в атмосферу относятся, прежде всего, сжигание угля, нефти, древесины (Маринайте и др., 2023; Tripathee et al., 2019). Из атмосферы загрязняющие вещества поступают на подстилающую поверхность посредством влажного (осадки, туман) и сухого (газы, частицы) осаждения. В Байкальском регионе на протяжении последнего десятилетия интенсивно исследуется динамика изменения климата и загрязнение воздушного бассейна от региональных промышленных предприятий и локальных источников на побережье озера. Наблюдения, проведенные в атмосфере над Байкалом во время крупных лесных пожаров в Прибайкалье, Красноярском крае и

Якутии в 2016–2020 гг., показали рост содержания в атмосфере аэрозольных частиц, газовых примесей (Ходжер и др., 2019; Zhamsueva et al., 2022), суммарной концентрации ПАУ (Marinaite et al., 2018), газообразной ртути (Mashyanov et al., 2021) в атмосферном воздухе над акваторией и побережьем озера. Эти токсичные вещества осаждаются на акваторию озера, загрязняя его воды (Gorshkov et al., 2021). Контроль загрязняющих примесей в атмосфере над озером является одной из приоритетных задач при мониторинге качества его вод.

2. Используемые методы и материалы

Для оценки вклада антропогенных источников Прибайкалья и опасных природных явлений (лесные пожары) в загрязнение атмосферы над оз. Байкал с 5 по 15 августа 2023 г. с борта научно-исследовательского судна “НИС Верещагин” проведены непрерывные измерения счетной и массовой концентрации аэрозольных частиц, газообразной

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: marin@lin.irk.ru (И.И. Маринайте)

Поступила: 13 мая 2024; Принята: 03 июня 2024;

Опубликована online: 19 июня 2024

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



элементарной ртути, отобрано и проанализировано 25 образцов аэрозоля на содержание ПАУ. Маршрут экспедиции проходил по всему периметру озера Байкал с остановками в районах крупных локальных источников загрязнения атмосферы на побережье озера, устьевых участках крупных притоков и заливах (Рис. 1).

Для исследования счетной концентрации и распределения частиц по размерам применялся счетчик частиц Handheld 3016 IAQ (фирма Lighthouse США), позволяющий измерять размеры частиц по 6 каналам (0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0, 10.0 мкм) в непрерывном режиме с усреднением в течение 5 минут. Измерения в воздухе газообразной элементарной ртути проводились с использованием портативного автоматического ртутного монитора Lumex RA-915M (Россия). Состав аэрозоля на 21 компонент ПАУ проанализировали с помощью газовой хроматографии с масс-спектрометрическим детектированием на приборе GC/MS Triple Quad 7000C с GC System 7890B (фирма Agilent Technologies, США).

3. Результаты и обсуждение

В отличие от экспедиций в период лесных пожаров 2018–2020 гг., в 2023 г. дымовой аэрозоль в атмосфере над озером не наблюдался, хотя в конце лета фиксировались пожары на территории Якутии. Полная массовая концентрации частиц ТРМ изменялась в пределах от 1 до 12 мкг/м³ с максимумом над Южным Байкалом в 10-12 мкг/м³, что до 10 раз выше фоновых значений. В Средней котловине изменения фиксировались в пределах от 3 до 4 мкг/м³, в Северной от 1 до 2 мкг/м³. В целом, по акватории озера полученные концентрации не превышали среднесуточной величины ПДК (60 мкг/м³) для атмосферного воздуха окружающей среды и соизмеримы с результатами 2022 г.

В динамике счетной концентрации аэрозольных частиц изменения отмечены как в средней фракции аэрозоля с размером до 1.0 мкм, так и в грубодисперсной фракции до 10 мкм. Во время экспедиционных работ отмечалось несколько эпизодов роста концентрации частиц средней фракции (PM₁ < 1мкм). По маршруту в фоновом районе вдоль восточного берега (середина маршрута от б. Ая – остров Лохматый), количество средней фракции (PM₁ < 1мкм) составляло 62% (Рис. 3, проба 14). В устье Харауза и при переходе от восточного берега к западному (устье Харауза-Большое Голоустное) за счет действующего над оз. Байкал в этот период циклона, содержание средней фракции достигало 65% (пробы 21-23). В Южном Байкале с приближением к локальным источникам количество средней фракции аэрозоля резко снижалось с 43% до 27% (пробы 2-3), в Среднем Байкале у п. Усть-Баргузин – до 24% (Рис. 3, проба 15).

Полученная динамика распределения концентрации суммы ПАУ соответствовала динамике концентрации аэрозольных частиц над акваторией Байкала (Рис. 2), что подтверждается тесными корреляционными связями между ними (Таблица 1) и указывает на сходные источники их происхождения. Корреляция же концентрации газообразной ртути с концентрациями ПАУ и PM₁₀ практически отсутствовала (Таблица 1).

За исследуемый период суммарная концентрация ПАУ в приземной атмосфере изменялась от 0.008 до 8.4 нг/м³ (среднее значение 1.1 ± 2.0 нг/м³) с наибольшими значениями в Южной котловине Байкала (6.3-8.4 нг/м³). В Средней котловине изменения были в пределах от 0.050 до 1.5 нг/м³, в Северной от 0.045 до 0.46 нг/м³. Полученные результаты в экспедиционный период 2023 года оказались ниже концентраций при пожарах на побережье озера в 2016 г. (0.22-133 нг/м³,



Рис.1. Карта-схема движения научно-исследовательского судна “Г.Ю.Верещагин” по акватории оз. Байкал с 5.08 по 15.08.2023 г.

Таблица 1. Коэффициенты парной корреляции между суммарной концентрацией ПАУ, массовой концентрацией аэрозольных частиц разных размерных фракций и ртути над поверхностью оз. Байкал

	ПАУ	ТРМ	PM ₁ < 1 мкм	PM ₁₀ > 1 мкм	Ртуть
ПАУ	1.00				
ТРМ	0.49	1.00			
PM ₁ < 1 мкм	0.71	0.79	1.00		
PM ₁₀ > 1 мкм	0.32	0.96	0.58	1.00	
Ртуть	0.21	0.23	0.48	0.09	1.00

Примечание: ТРМ – суммарная концентрация аэрозольных частиц; PM₁ < 1 мкм – среднedisперсная фракции аэрозоля с размером частиц менее 1 мкм; PM₁₀ > 1 мкм – грубодисперсная фракция аэрозоля с размером частиц до 10 мкм (Ивлев и Довголюк, 1999).

среднее 5.9 ± 22.6 нг/м³), на уровне значений над акваторией озера в 2019 г. ($0.11-4.6$ нг/м³, среднее 0.96 ± 1.0 нг/м³), но выше концентраций ПАУ в 2020 г. – от 0.07 до 2.5 нг/м³ (среднее значение 0.4 ± 0.5 нг/м³),).

Во время работ в Южной котловине Байкала повышенное содержание ПАУ до 180 раз от фоновых значений наблюдалось на маршруте вдоль западного побережья озера по направлению Кадильный – Листвянка – Исток р. Ангары (до 3.7 нг/м³ проба № 1-2, Рис. 2) и на стоянке у г. Слюдянка (до 8.4 нг/м³ проба № 4), у г. Байкальск (до 1.1 нг/м³ проба № 5) в условиях штилевой погоды и выноса аэрозоля от локальных источников побережья. На маршруте вдоль восточного, а затем вдоль западного берега из Южного Байкала в Средний и далее в Северный (п. Боярск – устье Харауза – остров Ольхон – мыс Елохин – г. Северобайкальск) содержание суммы ПАУ в аэрозоле было низким (0.05 нг/м³) с постепенным возрастанием (до 0.12 нг/м³, Рис. 2) при подходе к г. Северобайкальску. Практически за весь этот период в атмосфере наблюдалась низкая облачность, сопровождавшаяся периодически выпадающими осадками, приводящими к очищению атмосферы. Во время работ по Северному Байкалу, повышенное содержание суммы ПАУ наблюдалось на стоянке у г. Северобайкальск (0.46 нг/м³, проба №11), предположительно за счет выбросов продуктов сгорания ТЭЦ города Северобайкальска. При следовании судна вдоль восточного берега из фоновых районов Северного Байкала (бухта Ая – Хакусы – Чивыркуйский залив) было выявлено низкое содержание суммы ПАУ $0.045-0.16$ нг/м³ (пробы № 12-19). Метеорологическая обстановка в этот период характеризовалось наличием небольших инверсий, низкой облачностью и периодически выпадающими осадками, которые приводили к очищению атмосферы. Снижение концентрации загрязняющих примесей отмечено в Среднем Байкале при переходе от мыса Бакланий до устья Харауза ($0,07-0,09$ нг/м³ пробы № 20-21). На переходе от восточного берега на западный по маршруту устье Харауза – Большое Голоустное и далее вдоль западного берега в Южный Байкал (м. Кадильный – Большие Коты – п. Листвянка), содержание ПАУ возросло от 1.5 до 6.4 нг/м³ (пробы № 21-23, Рис. 2). Их рост так же отмечен в истоке р. Ангара (0.97 нг/м³, пробы № 24-25). Концентрация бенз(а)пирена, нормируемого в России, над всей аквато-

рией оз. Байкал изменялась от 0.001 до 0.84 нг/м³ (среднее 0.09 ± 0.2 нг/м³), и не превышала норм ПДК (1 нг/м³).

Отмечены различия в составе индивидуальных ПАУ, отобранных из различных районов над поверхностью озера (Рис. 4). Из 21 обнаруженных ПАУ доля основных соединений уменьшалась в последовательности: пирен (11.8%) > бенз(к)флуорантен (11.7%) > индено(1,2,3-с,d)пирен (8,3%) > бенз(е)пирен (7%), бенз(а)пирен (7%). В пробах аэрозолей вблизи локальных источников южной части Байкала (№ 4, 11, 23) преобладала группа ПАУ с четырьмя-пятью- шестью бензольными кольцами их доля – до 84% от общей массы. Это указывает

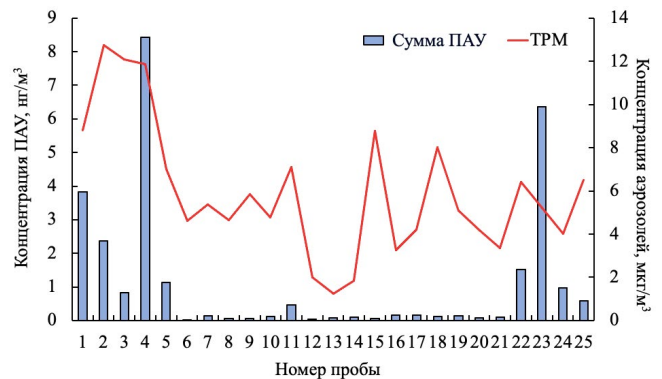


Рис.2. Массовая концентрация частиц ТРМ (мкг/м³), усредненная для каждой пробы, и сумма 21 ПАУ (нг/м³) в атмосфере над акваторией оз. Байкал (5-15 августа 2023 г.)

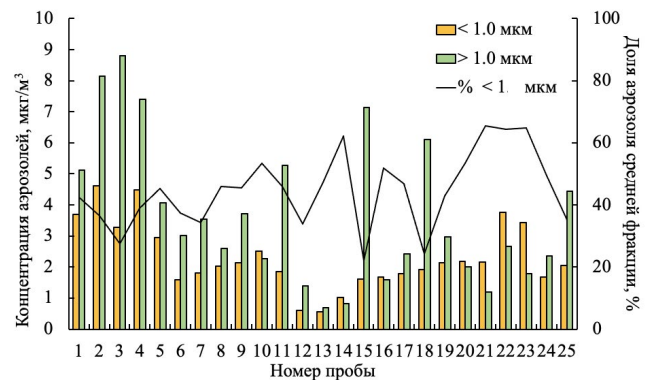


Рис.3. Изменчивость массовой концентрации (мкг/м³) средней (PM₁ < 1 мкм) и грубодисперсной фракции (PM₁₀ от 1 мкм до 10 мкм) аэрозоля и доля (%) средней фракции в общей массе аэрозоля в приводной атмосфере оз. Байкал (5-15 августа 2023 г.)

на пирогенный характер источников при сжигании угля, древесины, жидкого топлива (Othman et al., 2022). В пробе 12 на маршруте г. Северобайкальск – бухта Ая количество ретена (компонента горения биомассы) достигало 18 % от общей массы обнаруженных соединений.

Оценены потоки ПАУ из атмосферы на поверхность озера. Для их определения использовали скорость осаждения 0.02 м/сек частиц, принятую в работе (Duce and Neil, 1991). Как и концентрации, максимальные потоки ПАУ определены у локальных источников вдоль западного (Листвянка, исток Ангары) и восточного (г. Слюдянка) побережья Южного Байкала (1.7 - 102 мкг/м²/неделя). В Среднем Байкале потоки ПАУ составили 0.6-1.7 мкг/м²/неделя, в Северном – 0.5-5.6 мкг/м²/неделя с повышенным значением у г. Северобайкальска. Результаты оказались в 15 раз ниже потоков, рассчитанных для района Бугульдейки при пожарах летом 2016 г. (490-1600 мкг/м²/неделя) (Marinaite et al., 2018).

Концентрация газообразной элементарной ртути над озером изменялась от 0.18 до 1.29 нг/м³. Наибольшие значения обнаружены в Южном Байкале (0.4-1.29 нг/м³, средняя величина 0.76 ± 0.19 нг/м³). В Среднем Байкале ее изменения были в пределах от 0.18 до 1.07 нг/м³ (средняя 0.73 ± 0.13 нг/м³), Северном от 0.19 до 1.02 нг/м³ (средняя 0.72 ± 0.12 нг/м³). Таким образом, средние значения концентрации газообразной элементарной ртути в экспедиции 2023 г. над озером изменялись незначительно и оказались ниже средних величин 1.1 нг/м³ (Mashyanov et al., 2021), проанализированных над озером в июле 2018 года во время дымового смога от лесных пожаров. За время экспедиции существенных аномалий концентрации ртути в воздухе над озером обнаружено не было. Некоторое повышение ее концентрации в Южном Байкале можно объяснить переносом от локальных источников – котельных, ТЭЦ, расположенных в населенных пунктах побережья, а также переносом загрязнений от крупных ТЭЦ из городов Прибайкалья по долине р. Ангары (Рис. 5). Потенциальным естественным источником выбросов ртути в атмосферу может быть дегазация ртути через зоны глубинных разломов, так как Байкал находится в пределах сейсмически активной Байкальской рифтовой зоны. В литературе приводятся данные небольшого увеличения концентрации ртути до 1.6 нг/м³ над газогидратными залежами и выходами нефти на поверхность озера (Mashyanov et al., 2021), хотя однозначных доказательств связи воздушных ртутных аномалий с тектоническими структурами не найдено. Средняя концентрация ртути 0.74 ± 0.17 нг/м³, зафиксированная во время экспедиции над Байкалом, была в два раза меньше средней величины – 1.6 ± 0.15 нг/м³, зафиксированной на береговой станции мониторинга западного побережья Южного Байкала в п. Листвянка в те же дни наблюдений (Луцкий и др., 2023) и, вероятно, объясняется осаждением ее из атмосферы в процессе конденсации влаги над водной поверхностью.

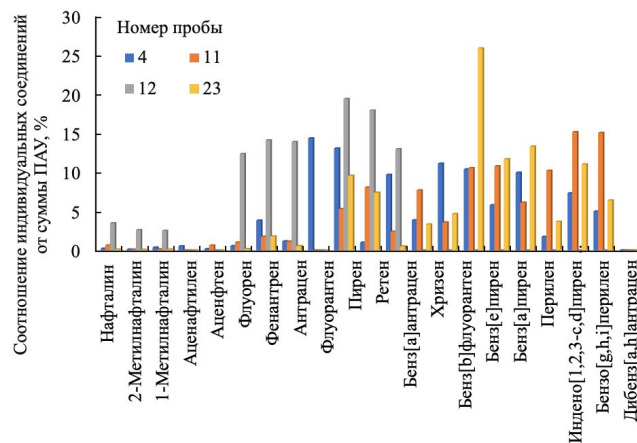


Рис. 4. Доля (%) индивидуальных соединений от суммарной концентрации ПАУ в пробах аэрозоля № 4, 11, 12, 23 над поверхностью Байкала (5-15 июля 2023 г.)

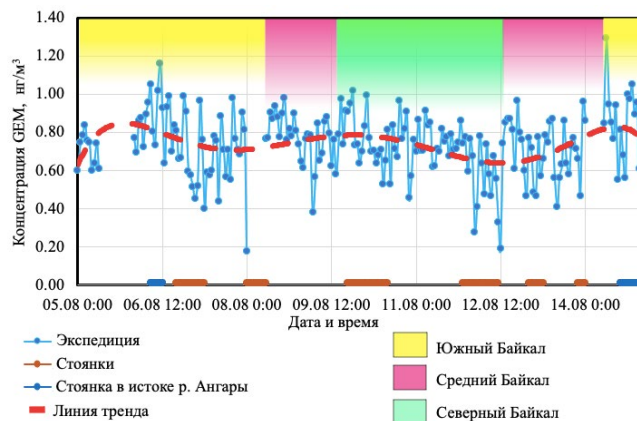


Рис. 5. Изменчивость концентрации газообразной элементарной ртути (нг/м³) в атмосфере над поверхностью южной, средней и северной котловинами Байкала (5-15 июля 2023 г.)

4. Заключение

Во время экспедиционных работ на судне НИС «Г.Ю.Верещагин» с 5 по 15 августа 2023 г. выявлена пространственно-временная картина распределения загрязняющих примесей (PM₁₀, ПАУ и газообразной элементарной ртути) в атмосфере над акваторией оз. Байкал, оценены потоки на водную поверхность озера. Повышение концентрации до 180 раз от фоновых значений для ПАУ, до 10 раз для PM₁₀ (определенных в чистых районах озера), наблюдались в Южном Байкале у населенных пунктов (п. Листвянка, гг. Слюдянка, Байкальск) в условиях штилевой погоды и в Истоке Ангары при северо-западном ветре. При этом концентрации бенз(а)пирена и аэрозольных частиц не превышали стандартов качества воздуха. Обнаружена положительная корреляция концентрации суммы ПАУ с средней (PM₁ < 1мкм) и грубодисперсной (PM₁₀ от 1 до 10 мкм) фракциями аэрозоля, что указывает на сходное расположение их источников. Потоки ПАУ на водную поверхность озера были в 15 раз ниже значений, полученных в пожароопасный период 2016 года. Средняя концентрация ртути в атмосфере над озером (0.74 ± 0.17 нг/м³) определена ниже уровня береговых значений на станции мониторинга в п. Листвянка (1.6 ± 0.15 нг/м³).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (19-77-20058 П). Химический анализ ПАУ выполнен с использованием оборудования Центра коллективного пользования “Ультромикроанализ” Лимнологического института СО РАН.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Ивлев Л.С., Довголюк Ю.А. 1999. Физика атмосферных аэрозольных систем. Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского Государственного университета.

Луцкин Е.С., Шиховцев М.Ю., Моложникова Е.В. и др. 2023. Ртуть в атмосферном воздухе и осадках в 2022-2023 гг. на станции Листвянка (Южное Прибайкалье). В: XXX рабочая группа «Аэрозоли Сибири», С. 21-22.

Маринайте И.И., Ходжер Т.В., Оболкин В.А. и др. 2023. Полициклические ароматические углеводороды и частицы PM_{10} , $PM_{2.5}$, PM_1 в атмосфере Южного Прибайкалья. Метеорология и гидрология 48 (4): 22-32. DOI: [10.52002/0130-2906-2023-4-22-32](https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-4-22-32)

Ходжер Т.В., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С. и др. 2019. Результаты корабельных исследований аэрозольно-газовых примесей над акваторией оз. Байкал летом 2018 г. Оптика атмосферы и океана 32 (4): 289-295. DOI: [10.15372/AOO20190406](https://doi.org/10.15372/AOO20190406)

Duce R.A., Neil W.T. 1991. Atmospheric transport of iron and its deposition in the ocean. *Limnology and Oceanography* 36 (8):1715-1726. DOI: [10.4319/lo.1991.36.8.1715](https://doi.org/10.4319/lo.1991.36.8.1715)

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 (2636): 1-16. DOI: [10.3390/w13192636](https://doi.org/10.3390/w13192636)

Kaleta D., Kozielska B. 2023. Spatial and Temporal Volatility of $PM_{2.5}$, PM_{10} and PM_{10} -Bound B[a]P Concentrations and Assessment of the Exposure of the Population of Silesia in 2018–2021. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 20(1): 138. DOI: [10.3390/ijerph20010138](https://doi.org/10.3390/ijerph20010138)

Marinaite I.I., Molozhnikova E.V., Khodzher T.V. 2018. PAHs transfer and intake to the water area of Lake Baikal during the summer forest fires in 2016. *Proceedings of SPIE* 1083374. DOI: [10.1117/12.2502818](https://doi.org/10.1117/12.2502818)

Mashyanov N., Obolkin V., Pogarev S. et al. 2021. Air mercury monitoring at the Baikal area. *Atmosphere* 12(7): 807. DOI: [10.3390/atmos12070807](https://doi.org/10.3390/atmos12070807)

Othman N., Ismail Z., Selamat M. et al. 2022. Review of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) Pollution in the Air: Where and How Much Are We Exposed to? *International Journal of Environmental Research and Public Health* 19 (21): 13923. DOI: [10.3390/ijerph192113923](https://doi.org/10.3390/ijerph192113923)

Tripathi L., Guo J., Kang S. et al. 2019. Spatial and temporal distribution of total mercury in atmospheric wet precipitation at four sites from the Nepal-Himalayas. *Science of the Total Environment* 655:1207-1217. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2018.11.338](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.338)

Zhamsueva G., Zayakhanov A., Khodzher T. et al. 2022. Studies of the dispersed composition of atmospheric aerosol and its relationship with small gas impurities in the near-water layer of Lake Baikal based on the results of ship measurements in the summer of 2020. *Atmosphere* 13(1): 139. DOI: [10.3390/atmos13010139](https://doi.org/10.3390/atmos13010139)