

Aerosol pollution of the atmosphere at southeastern coast of Lake Baikal during of wildfires in Siberia

Original Article

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Dementeva A.L.^{1,2*}, Zhamsueva G.S.^{1,2}, Zayakhanov A.S.^{1,2}, Khodzher T.V.²,
Tsydypov V.V.¹, Balzhanov T.S.^{1,2}, Starikov A.V.¹

¹Institute of Physical Material Science of the SB RAS, Sahyanovoy Str., 6, Ulan-Ude, 670047, Russia

²Limnological Institute of the SB RAS, Ulan-Batorskaya Str., 3, Irkutsk, 664033, Russia

ABSTRACT. Comprehensive studies of aerosol pollution in the atmosphere were conducted at "Boyarsky" scientific station from spring to autumn 2024. The results of expeditionary work revealed the impact of smoke aerosol on the air quality at "Boyarsky" station, transported from both western and eastern directions. The highest concentrations of aerosols PM_{2.5} up to 42 µg/m³ and PM₁₀ up to 104.4 µg/m³ were recorded from July 31 to August 1, as well as on August 16 and 20, 2024, due to the transport of smoke aerosols from wildfire areas in the Irkutsk region, the Republic of Buryatia, and Yakutia. During the same study, measurements of the number concentration of submicron aerosol (SMA) were conducted. The measurement results showed that from August 16 to 24, 2024, the temporal variation in the number concentration of SMA mirrored the variation in the mass concentration of PM_{2.5} and PM₁₀ aerosols at "Boyarsky" station. A sharp increase in the number concentration of submicron aerosol up to 150 cm⁻³ and the mass concentration of PM₁₀ up to 95 µg/m³ during daytime hours indicates the transport of smoke aerosol.

Keywords: atmosphere, aerosol, wildfires, Lake Baikal, MODIS

For citation: Dementeva A.L., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Khodzher T.V., Tsydypov V.V., Balzhanov T.S., Starikov A.V. Aerosol pollution of the atmosphere at southeastern coast of Lake Baikal during of wildfires in Siberia // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 1052-1061. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-1052

1. Introduction

Atmospheric aerosols are one of the most important parameters of climate system and biggest problem in the ongoing climate change (IPCC, 2013; Johnson et al., 2021). Aerosols play a significant role in atmospheric processes. They affect the climate, living organisms, and human activities. Aerosols are divided into primary aerosols, which enter the atmosphere directly from sources, and secondary aerosols, which form as a result of heterogeneous chemical reactions in the air (Koulouri et al., 2008; Lin et al., 2021). The heterogeneous spatial and temporal distribution of aerosols represents one of the greatest uncertainties in determining global radiative forcing. Many global and regional ground-based networks have been established over the past few decades to continuously obtain quantitative measurements of the optical and microphysical properties of aerosols. Thus, detailed knowledge of aerosol properties and the identification of different aerosol types in various regions of the world will allow for a

better understanding of the impact of aerosols on radiation and climate (Rupakheti et al., 2020; Ozdemir et al., 2020; Dementeva et al., 2022).

The formation of atmospheric aerosols is influenced by various factors, one of the main ones being the long-range transport of pollutants. In recent years, smoke aerosol from wildfires has had a significant impact on the atmosphere at both regional and global levels (Chen et al., 2021; Zhamsueva et al., 2021). Among other effects, the formation of smoke aerosol influences the radiative properties of atmosphere, alters cloud characteristics, and affects the atmospheric balance of several elements and compounds.

The atmosphere of Lake Baikal is particularly vulnerable to impacts from both anthropogenic sources and extreme natural events such as wildfires (Balin et al., 2016; Khodzher et al., 2024; Zhamsueva et al., 2024). The lack of information on aerosol characteristics and absence of systematic data on dynamics of atmospheric component parameters in regions where the influence of natural factors on the environment is

*Corresponding author.

E-mail address: ayunadem@gmail.com (A.L. Dementeva)

Received: July 30, 2025; **Accepted:** August 21, 2025;

Available online: August 31, 2025

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



most pronounced determine the relevance and necessity of expanding and deepening comprehensive experimental observations and theoretical studies. Therefore, monitoring aerosols, trace gases, and meteorological parameters is an important prerequisite for reliable predictive assessments of air quality and for addressing climate and environmental issues.

2. Materials and methods

Measurements were conducted at "Boyarsky" scientific station (51°50'47" N, 106°04'01" E), which is located in the coastal zone on the southeastern shore of Lake Baikal. The position of Baikal within the region creates significant temperature contrasts between the lake and the adjacent territory, which are further enhanced by enclosed location of lake, surrounded on all sides by mountain ranges. The station cannot be fully considered background for the region, as its area is subject to indirect influence from several industrial centers (Irkutsk-Cheremkhovsky hub, Babushkin city, Kamensk settlement, Selenginsk settlement). However, its location in the forest zone and the considerable distance from industrial emission sources allow the station to be regarded as a site weakly impacted by anthropogenic effects.

Measurements of mass concentrations of atmospheric aerosol fractions PM_{2.5} and PM₁₀ were taken using the «DustTrak 8533» analyzer, manufactured by TSI Incorporated, USA, from May 15 to October 7, 2024. The principle of operation of the optical «DustTrak 8533» analyzer is based on registering radiation scattered by fine particles and counting individual particles on a photodetector (Zagainov, 2006). This portable device allows obtaining particle fraction concentrations in real time. However, measured concentration data for PM_{2.5} and PM₁₀ fractions obtained by the optical analyzer often show comparable values. This fact was also noted in studies (Javed and Guo, 2021; Moazami et al., 2022) following the intercalibration of the «DustTrak 8533» analyzer with the gravimetric method. It was found that correction coefficients need to be applied when analyzing data, as the device overestimates PM_{2.5} concentrations by a factor of 2 and underestimates PM₁₀ concentrations by 20%. Accordingly, these correction coefficients were introduced into the experimental measurement results of PM_{2.5} and PM₁₀ aerosol concentrations at Boyarsky station.

To determine air mass transport pathways and the distribution of dominant aerosol components (sulfate aerosol, dust, smoke) over the Baikal region, the HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) trajectory model was used (Draxler, 1999; Stein et al., 2015). To identify aerosol types, analyses of MODIS MAIAC satellite imagery, Blue Aerosol Type (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>), and lidar measurement results from the spaceborne CALIOP instrument on the CALIPSO satellite (<https://www-calipso.larc.nasa.gov/>) were employed. CALIOP provides information on the vertical distribution of aerosols, clouds, and their types.

3. Results and discussion

Comprehensive studies of aerosol pollution in the atmosphere using an automated measurement complex were conducted from spring to autumn 2024 at "Boyarsky" scientific station. As is known, the main air pollutants emitted during wildfires are fine particles of fractions PM₁₀ and PM_{2.5}. About 80%–90% of the mass of solid particles consists of PM_{2.5}, with high contents of black carbon, organic carbon, and brown carbon (Gyawali et al., 2009; Yousouf et al., 2014). Over the entire measurement period, the average mass concentration of PM_{2.5} was 9.3 µg/m³ and 23.1 µg/m³ for PM₁₀. The results of the expeditionary work revealed the influence of smoke aerosol on the air quality at the "Boyarsky" station, transported from both western and eastern directions. The analysis of MODIS MAIAC satellite images and Blue Aerosol Type data, aimed at identifying aerosol types, along with backward trajectory calculations of air mass transport using the HYSPLIT model, allowed the identification of aerosol sources in the atmosphere at the Boyarsky station. The analysis results showed that in July at "Boyarsky" station, under the influence of smoke aerosol on air quality, the mass concentration of PM_{2.5} increased from 15 µg/m³ to 35.5 µg/m³ and PM₁₀ from 31 µg/m³ to 87.6 µg/m³, with the dominant aerosol type being smoke aerosol. Under background conditions, the concentrations of these aerosol fractions were PM_{2.5} – 4 µg/m³, PM₁₀ – 9 µg/m³, and the prevailing aerosol type was clean continental aerosol. The highest aerosol concentrations of PM_{2.5} up to 42 µg/m³ and PM₁₀ up to 104.4 µg/m³ were recorded from July 31 to August 1, and on August 16 and 20, 2024, due to the transport of smoke aerosols from wildfire hotspots in the Irkutsk region, the Republic of Buryatia, and Yakutia, as well as the transport of smoke from industrial emissions in the Angara River valley during the passage of atmospheric fronts. Increased atmospheric turbidity at "Boyarsky" station due to aerosol pollution during smoke aerosol transport episodes was observed as an increase in aerosol optical depth (AOD) at a wavelength of 0.5 µm up to 0.4–0.5 in July–August 2024.

Figure 1a presents the time series of the mass concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ for the period July 17 – August 1, 2024, at "Boyarsky" station, when smoke aerosol transport from wildfire hotspots in the Irkutsk region was observed. The highest average 10-minute concentrations of fine aerosol fraction PM_{2.5} – 36.5 µg/m³, PM₁₀ – 87.6 µg/m³ were detected from July 19 to 20. On July 19, after 3 p.m., an increase in PM₁₀ from 31 µg/m³ to 87.6 µg/m³ was noted until July 21. According to MODIS Deep Blue Aerosol Type satellite images, the dominant aerosol type in the days of observation around Lake Baikal was predominantly smoke aerosol (Fig. 1b). Backward trajectory calculations showed that transport at altitudes of 1500–2500 m occurred from the north and northwest. From July 21 after midnight, a decrease in PM concentrations to 4 µg/m³ was noted with a wind direction shift from northwestern to southeastern (Fig. 1c). A similar situation was observed from July 30 to August 1, when

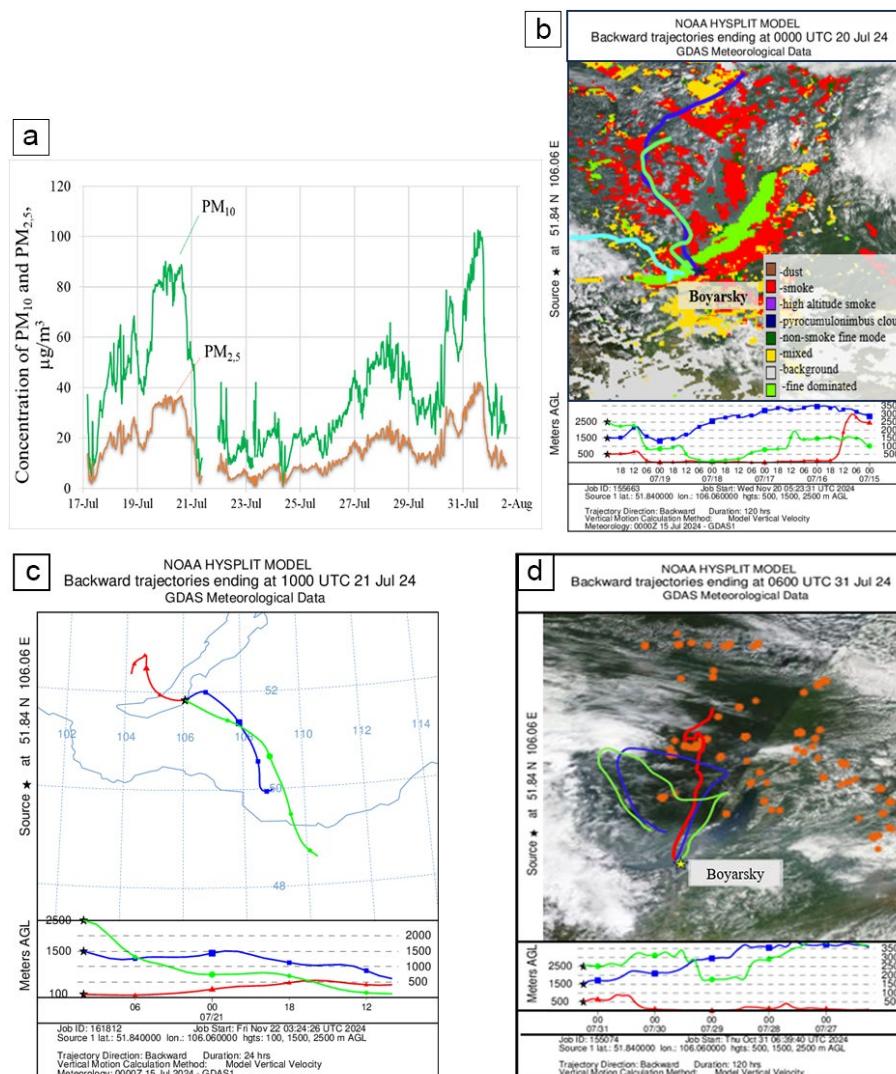


Fig.1. a) Time series of the mass concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} for the period July 17 – August 1, 2024, at the “Boyarsky” station; b) MODIS Deep Blue Aerosol Type satellite image and backward air mass trajectories for July 19–20; c) Backward air mass trajectories for July 21; d) Backward air mass trajectories for July 31 according to the HYSPLIT model.

$PM_{2.5}$ concentrations increased to $42 \mu g/m^3$ and PM_{10} to $104.4 \mu g/m^3$. During these days, the measurement site was influenced by wildfire smoke and simultaneously experienced the transport of anthropogenic pollutants from the Irkutsk region at altitudes of 1500–2500 m (Fig. 1d).

Measurements of the number concentration of submicron aerosol (SMA) were conducted during the study using a DAS 2702 M diffusion aerosol spectrometer from «AeroNanoTech», Moscow. The measurement results showed that from August 16 to 24, 2024, the temporal variation in the number concentration of SMA mirrored the variation in the mass concentration of $PM_{2.5}$ and PM_{10} aerosols at “Boyarsky” station. As seen in Figure 2, high concentrations of $PM_{2.5}$, PM_{10} , and SMA aerosols were observed on August 16 and 20 at “Boyarsky” station. A sharp increase in the number concentration of submicron aerosol (SMA) up to $150 cm^{-3}$ (Fig. 2b) and the mass concentration of PM_{10} up to $95 \mu g/m^3$ (Fig. 2a) during daytime hours indicates the transport of smoke aerosol.

Analysis of data from the automated meteorological station AMK-03 and weather maps based on the GFS model (Global Forecast System, USA, (<https://www.wetter3.com>)) showed that the main cause of high

aerosol concentrations on August 16 at the southeastern coast of Lake Baikal was the transport of smoke aerosol during the passage of a cold anticyclone from northeast, originating in Yakutia and the Irkutsk region (Fig. 3c,d,e). The drop in air temperature on August 15–16 to 16–18°C (Fig. 3a,b) led to an increase in concentrations of suspended particles: $PM_{2.5}$ – $38.8 \mu g/m^3$, PM_{10} – $95 \mu g/m^3$ and SMA – $150 cm^{-3}$.

Calculations of air mass transport pathways were performed using the HYSPLIT trajectory model and aerosol $PM_{2.5}$ concentration was estimated using the chemical transport model SILAM, developed by the Finnish Meteorological Institute and presented graphically on the Ventusky website (<https://www.ventusky.com>), to identify the source of elevated aerosol concentrations $PM_{2.5}$ – $34.2 \mu g/m^3$, PM_{10} – $82.2 \mu g/m^3$, and SMA – $120 cm^{-3}$ on August 20, 2024, at “Boyarsky” station. During this period, wildfires were observed in the northeast of Republic of Buryatia, where the maximum $PM_{2.5}$ concentration reached $100 \mu g/m^3$ (Fig. 4). According to backward trajectory calculations by the HYSPLIT model, the transport of smoke aerosol from wildfire hotspots in Republic of Buryatia at “Boyarsky” station occurred at altitudes of 100 and 1000 m, predominantly in the atmospheric surface layer.

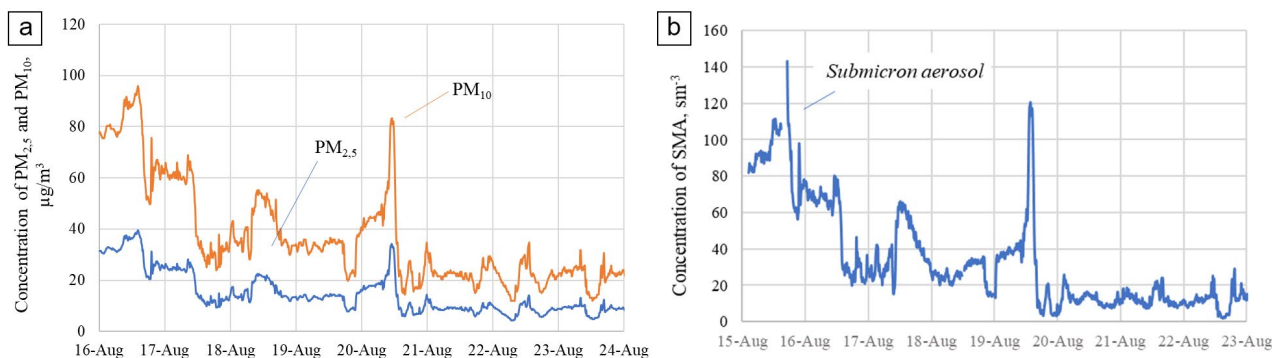


Fig.2. a) Time series of the mass concentration of $PM_{2.5}$ and PM_{10} aerosol fractions; b) Number concentration of submicron aerosol at “Boyarsky” station, August 16–24, 2024.

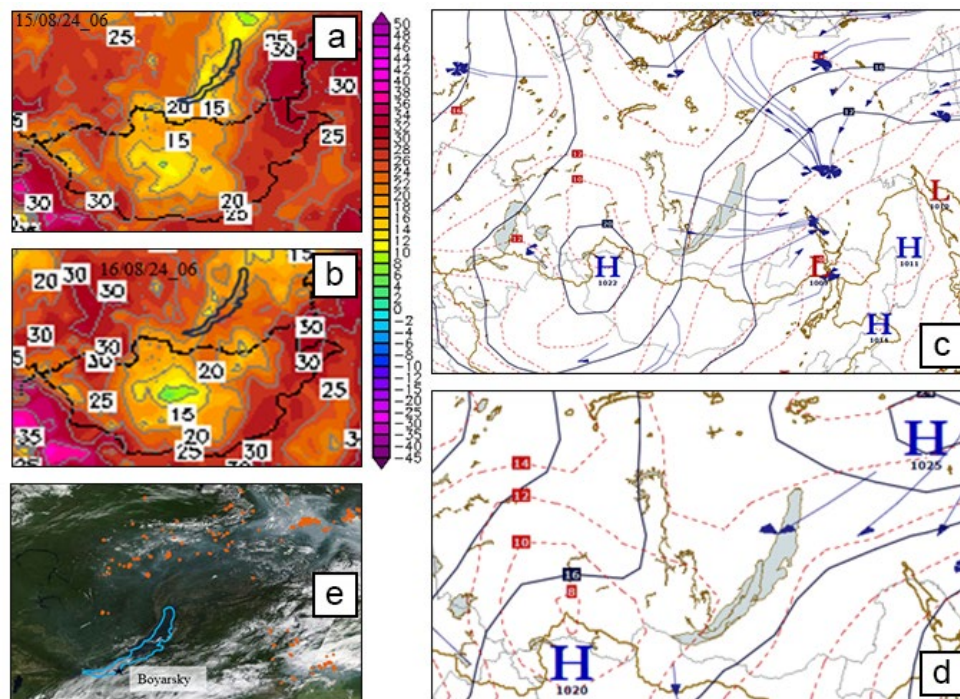


Fig.3. Weather map of air temperature distribution, August 14–16, 2024 (a–c); Synoptic situation over Lake Baikal, August 15 (d), August 16, 2024 (e); Fire map for August 16.

4. Conclusion

Comprehensive studies of aerosol pollution in the atmosphere were conducted at “Boyarsky” scientific station from spring to autumn 2024. Over the entire measurement period, the average mass concentration of $PM_{2.5}$ was $9.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $23.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{10} . The main factor influencing the formation of aerosol composition in recent years is smoke emission from intense wild and peat fires across a vast area of Siberia.

During episodes of smoke aerosol transport, an increase in aerosol optical depth up to 0.4–0.5 at a wavelength of $0.5 \mu\text{m}$ was observed in July–August 2024. This resulted in a rise in the mass concentration of $PM_{2.5}$ from $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $35.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and PM_{10} from $31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ to $87.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. The maximum aerosol concentrations of $PM_{2.5}$ at $42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and PM_{10} at $104.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ were recorded from July 31 to August 1, and on August 16 and 20, 2024. Analysis of MODIS MAIAC satellite images and Blue Aerosol Type data aimed at identifying aerosol types, along with backward air mass trajectory calculations using the HYSPLIT model, made it possible to identify the sources of aerosols in the atmosphere. The analysis showed that the main cause of elevated

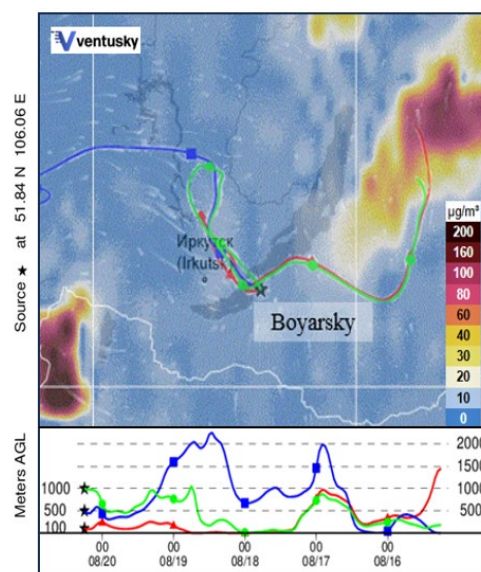


Fig.4. Spatial distribution of the mass concentration of $PM_{2.5}$ aerosol fraction according to the SILAM model on August 20, 2024; backward air mass trajectories from the HYSPLIT model.

aerosol concentrations in July at "Boyarsky" station was the transport of smoke aerosols from wildfire hotspots in the Irkutsk region, the Republic of Buryatia, and Yakutia, as well as the transport of smoke from industrial emissions in the Angara River valley during the passage of atmospheric fronts.

Acknowledgements

This work was carried out with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (budget funds of the IPMS SB RAS within the framework of State Assignment No. 124041500027-2) for scientific equipment and partially with the financial support of the Russian Science Foundation (RSF) within the framework of research project No. 19-77-20058-P for data analysis and processing.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, in *Climate Change*. 2013. The Physical Science Basis Cambridge Univ. Press, New York, USA. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf (accessed on 02/07/2024)
- Balin Yu.S., Klemasheva M.G., Kokhanenko G.P. et al. 2016. Lidar studies of the vertical structure of aerosol fields over Lake Baikal atmosphere during wildfires. *Atmospheric and oceanic optics* 29(8): 689–693. (in Russian)
- Chen Y., Cao C., Cao Y. et al. 2021. Observed evidence of the growing contributions to aerosol pollution of wildfires with diverse spatiotemporal distinctions in China. *Journal of Cleaner Production* 298: 126860. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.126860](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126860)
- Dementeva A., Zhamsueva G., Zayakhanov A. et al. 2022. Interannual and Seasonal Variation of Optical and Microphysical Properties of Aerosol in the Baikal Region. *Atmosphere* 13: 211. DOI: [10.3390/atmos13020211](https://doi.org/10.3390/atmos13020211)
- Draxler R.R. 1999. HYSPLIT4 user's guide. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-230, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.
- Gyawali M., Arnott W.P., Lewis K. et al. 2009. In situ aerosol optics in Reno, NV, USA during and after the summer 2008 California wildfires and the influence of absorbing and non-absorbing organic coatings on spectral light absorption. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9: 8007–8015.
- Javed W., Guo B. 2021. Performance evaluation of real-time DustTrak monitors for outdoor particulate mass measurements in a desert environment. *Aerosol and Air Quality Research* 21(6): 200631. DOI: [10.4209/aaqr.200631](https://doi.org/10.4209/aaqr.200631)
- Johnson M.S., Strawbridge K., Knowland K.E. et al. 2021. Long-range transport of Siberian biomass burning emissions to North America during FIREX-AQ. *Atmospheric Environment* 252: 118241. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2021.118241](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118241)
- Khodzher T.V., Yausheva E.P., Shikhovtsev M.Y. et al. 2024. Black Carbon in the Air of the Baikal Region, (Russia): Sources and Spatiotemporal Variations. *Applied Science* 14(16): 6996. DOI: [10.3390/app14166996](https://doi.org/10.3390/app14166996)
- Koulouri E., Saarikoski S., Theodosi C. et al. 2008. Chemical composition and sources of fine and coarse aerosol particles in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment* 42: 6542–6550. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2008.04.010](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.04.010)
- Lin C.-A., Lu C.-H., Chen S.-P. et al. 2021. Characterization of intra-continental smoke transport and impact on New York State air quality using aerosol reanalysis and multi-platform observations. *Atmospheric Pollution Research* 12: 154–166. DOI: [10.1016/j.apr.2021.01.021](https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.021)
- Moazami T.N., Svendsen K.H., Buhagen M. et al. 2022. Comparing PM_{2.5}, respirable dust, and total dust fractions using real-time and gravimetric samples in a human exposure chamber study. *Research Square*. PPR: PPR526390. DOI: [10.21203/rs.3.rs-1810629/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1810629/v1)
- Ozdemir E., Gizem Tuna T., Tolga E. 2020. Application of aerosol classification methods based on AERONET version 3 product over eastern Mediterranean and Black Sea. *Atmospheric Pollution Research* 11: 2226–2243. DOI: [10.1016/j.apr.2020.06.008](https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.06.008)
- Rupakheti D., Rupakheti M., Abdullaev S.F. et al. 2020. Columnar aerosol properties and radiative effects over Dushanbe, Tajikistan in Central Asia. *Environmental Pollution* 265: 114872. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.114872](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114872)
- Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D. et al. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96(12): 2059–2077. DOI: [10.1175/BAMS-D-14-00110.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1)
- Youssef H., Lioussé C., Roblou L. et al. 2014. Non-accidental health impacts of wildfire smoke. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11: 11772–11804. DOI: [10.3390/ijerph111111772](https://doi.org/10.3390/ijerph111111772)
- Zagaynov V.A. 2006. Diffusion spectrometer for diagnostics of nanoparticles in the gas phase. *Nanotechnology* 1: 141–146.
- Zhamsueva G., Zayakhanov A., Tsydygov V. et al. 2021. Spatial-Temporal Variability of Small Gas Impurities over Lake Baikal during the Forest Fires in the summer of 2019. *Atmosphere* 12(1): 20. DOI: [10.3390/atmos12010020](https://doi.org/10.3390/atmos12010020)
- Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Starikov A.V. et al. 2024. Component Composition of Aerosols and their Dynamics in the Atmosphere of the Baikal South-Eastern Coast. *Aerosol and Air Quality Research* 24(2): 230161. DOI: [10.4209/aaqr.230161](https://doi.org/10.4209/aaqr.230161)

Аэрозольное загрязнение атмосферы на юго-восточном побережье оз. Байкал в период лесных пожаров в Сибири

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

Дементьева А.Л.^{1,2*}, Жамсуева Г.С.^{1,2}, Заяханов А.С.^{1,2}, Ходжер Т.В.²,
Цыдыпов В.В.¹, Бальжанов Т.С.^{1,2}, Стариков А.В.¹

¹ Институт физического материаловедения Сибирского отделения РАН, ул. Сахьяновой, 6, г. Улан-Удэ, 670047, Россия

² Лимнологический институт Сибирского отделения РАН, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

АННОТАЦИЯ. Проведены комплексные исследования аэрозольного загрязнения атмосферы на научном стационаре «Боярский» весной-осенью 2024 г. По результатам экспедиционных работ выявлено влияние дымового аэрозоля на качество атмосферы ст. «Боярский» переносимого как с западного, так и с восточного направлений. Наиболее высокие концентрации аэрозолей $PM_{2.5}$ до 42 мкг/м³, PM_{10} до 104,4 мкг/м³ зафиксированы с 31 июля по 1 августа, 16 и 20 августа 2024 г. из-за заноса дымовых аэрозолей из очагов лесных пожаров в Иркутской области, Республики Бурятия и Якутии. В этот же период исследований проводились измерения счетной концентрации субмикронного аэрозоля (СМА). Результат измерений показал, что с 16 по 24 августа 2024 г. временной ход счетной концентрации СМА повторяет ход массовой концентрации аэрозоля фракции $PM_{2.5}$ и PM_{10} на ст. «Боярский». Резкое повышение счетной концентрации субмикронного аэрозоля до 150 см³ и массовой концентрации PM_{10} до 95 мкг/м³ в дневные часы свидетельствует о переносе дымового аэрозоля.

Ключевые слова: атмосфера, аэрозоль, лесные пожары, Байкал, MODIS

Для цитирования: Дементьева А.Л., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Ходжер Т.В., Цыдыпов В.В., Бальжанов Т.С., Стариков А.В. Аэрозольное загрязнение атмосферы на юго-восточном побережье оз. Байкал в период лесных пожаров в Сибири // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 1052-1061. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-1052

1. Введение

Атмосферные аэрозоли один из наиболее важных параметров климатической системы и самая большая проблема в продолжающемся изменении климата (IPCC, 2013; Johnson et al., 2021). Аэрозоль играет большую роль в атмосферных процессах. Он влияет на климат, живые организмы, жизнедеятельность человека. Аэрозоль делится на первичный, попадающий в атмосферу непосредственно из источников и вторичный, образующийся в результате гетерогенных химических реакций в воздухе (Koulouri et al., 2008, Lin et al., 2021). Неоднородное распределение аэрозолей в пространстве и времени являются одними из самых больших неопределенностей при определении глобального радиационного воздействия. Многие глобальные и региональные наземные сети были созданы для непрерывного получения количественных измерений оптических и микрофизических свойств аэрозолей за последние несколько десятилетий. Таким образом, под-

робные знания о свойствах аэрозолей и распознавание различных типов аэрозолей в разных регионах мира позволят лучше понять влияние аэрозолей на радиацию и климат (Rupakheti et al., 2020, Ozdemir et al., 2020, Dementeva et al., 2022).

На формирование атмосферных аэрозолей влияют различные факторы, одним из основных является дальний перенос загрязняющих веществ. В последние годы дымовой аэрозоль от лесных пожаров оказывает большое влияние на атмосферу как на региональном, так и на глобальном уровне (Chen et al., 2021, Zhamsueva et al., 2021). Помимо прочего, образование дымового аэрозоля влияет на радиационные свойства атмосферы, изменяет свойства облаков и влияет на атмосферный баланс ряда элементов и соединений.

Атмосфера оз. Байкал наиболее уязвима от воздействий как от антропогенных источников, так экстремальных природных явлений (лесные пожары) (Balin et al., 2016, Khodzher et al., 2024, Zhamsueva et al., 2024). Дефицит информации о характеристиках

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: ayunadem@gmail.com (А.Л. Дементьева)

Поступила: 30 июля 2025; Принята: 21 августа 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

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



аэрозоля, отсутствие систематизированных данных о динамике параметров компонентов атмосферы в регионах, где наиболее заметно влияние природных факторов воздействия на окружающую природную среду, предопределяет актуальность и необходимость расширения, углубления комплексных экспериментальных наблюдений и теоретических исследований. Поэтому мониторинг аэрозолей, следовых газов и метеорологических параметров является важной предпосылкой для надежных прогнозных оценок качества воздуха, решения климатических и экологических задач.

2. Материалы и методы

Измерения проводились на научном стационаре «Боярский» (51°50'47" с.ш. 106°04'01" в.д.), который расположен в прибрежной зоне на юго-восточном побережье оз. Байкал. Положение Байкала внутри области создает большие контрасты температур между озером и прилегающей территорией, которые усиливаются еще за счет закрытого положения озера, окруженного со всех сторон горными хребтами. Стационар нельзя в полной мере назвать фоновым для региона, т.к. его территория подвержена косвенному воздействию ряда промышленных центров (Иркутско-Черемховский узел, г. Бабушкин, п. Каменск, п. Селенгинск). Но все же его положение в лесной зоне и достаточно большое удаление от источников промышленных выбросов, позволяет рассматривать стационар как место, слабо подверженное антропогенному воздействию.

Измерения массовой концентрации атмосферного аэрозоля фракций $PM_{2.5}$ и PM_{10} проводились с помощью анализатора «DustTrak 8533», фирмы TSI Incorporated USA с 15.05 по 07.10.2024 г. Принцип работы оптического анализатора «DustTrak 8533» основан на регистрации рассеянного излучения мелкими частицами и подсчете отдельных частиц на фотодетекторе (Zagainov, 2006). Данный прибор портативный и позволяет получать концентрации частиц фракций PM в реальном режиме времени. Однако измеренные данные концентраций фракций $PM_{2.5}$ и PM_{10} оптическим анализатором зачастую показывают сравнимые значения. Данный факт также отмечен в работах (Javed and Guo, 2021, Moazami et al., 2022) в результате интеркалибровки анализатора «DustTrak 8533» с гравиметрическим методом. Выявлено, что при анализе данных анализатора необходимо вводить поправочные коэффициенты, т.к. прибор для частиц фракции $PM_{2.5}$ завышает концентрации в 2 раза и занижает на 20% для PM_{10} . В связи с этим в экспериментальные результаты измерений концентрации аэрозоля фракций $PM_{2.5}$ и PM_{10} на ст. Боярский введены эти поправочные коэффициенты.

Для определения путей переноса воздушных масс и распределения доминирующих компонентов аэрозоля (сульфатный аэрозоль, пыль, дым) над Байкальским регионом использована траекторная модель HYSPLIT (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) (Draxler, 1999, Stein et al.,

2015), для выявления типа аэрозоля проанализированы космоснимки MODIS MAIAC, Blue Aerosol Type (<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>) и результаты измерений лидаром «CALIOP» космического базирования на спутнике «CALIPSO» (<https://www-calipso.larc.nasa.gov/>), который предоставляет информацию о вертикальном распределении аэрозолей, облаков и их типах.

3. Результаты и обсуждение

Проведены комплексные исследования аэрозольного загрязнения атмосферы с использованием автоматизированного измерительного комплекса весной-осенью 2024 г. на научном стационаре «Боярский». Как известно, основными загрязнителями воздуха, которые выбрасываются во время лесных пожаров являются мелкодисперсные частицы фракции PM_{10} и $PM_{2.5}$. Около 80%–90% массы твердых частиц состоит из $PM_{2.5}$ с высоким содержанием черного углерода, органического углерода и коричневого углерода (Gyawali et al., 2009; Youssouf et al., 2014). За весь период измерений средняя массовая концентрация $PM_{2.5}$ составила 9,3 мкг/м³ и 23,1 мкг/м³ для PM_{10} . По результатам экспедиционных работ выявлено влияние дымового аэрозоля на качество атмосферы ст. «Боярский» переносимого как с западного, так и с восточного направлений. Анализ космоснимков MODIS MAIAC, Blue Aerosol Type с целью выявления типа аэрозолей и результаты расчетов обратных траекторий переноса воздушных масс по траекторной модели HYSPLIT позволили выявить источники происхождения аэрозолей в атмосфере ст. Боярский. Результаты анализа показали, что в июле на ст. «Боярский» при влиянии дымового аэрозоля на качество атмосферного воздуха отмечается рост массовой концентрации $PM_{2.5}$ с 15 мкг/м³ до 35,5 мкг/м³ и PM_{10} с 31 мкг/м³ до 87,6 мкг/м³ преобладает дымовой тип аэрозоля, в случае фоновых условий концентрации данных фракций аэрозоля составляют $PM_{2.5}$ - 4 мкг/м³, PM_{10} - 9 мкг/м³, преобладающий тип аэрозоля является чистый континентальный аэрозоль. Наиболее высокие концентрации аэрозолей $PM_{2.5}$ до 42 мкг/м³, PM_{10} до 104,4 мкг/м³ зафиксированы 31 июля по 1 августа, 16 и 20 августа 2024 г. из-за заноса дымовых аэрозолей из очагов лесных пожаров в Иркутской области, Республики Бурятия и Якутии, а также переноса дымов промышленных выбросов со стороны долины Ангары при прохождении атмосферных фронтов. Отмечено повышенное замутнение атмосферы на ст. «Боярский» из-за аэрозольного загрязнения в случаях заноса дымового аэрозоля наблюдалось увеличение АОТ на длине волны 0,5 мкм до 0,4-0,5 в июле - августе 2024 г.

На Рисунке 1а представлен временной ход массовой концентрации $PM_{2.5}$ и PM_{10} за период 17.07-01.08.2024 г. на ст. «Боярский», когда наблюдались заносы дымового аэрозоля из очагов лесных пожаров Иркутской области. Наиболее высокие усредненные 10 – минутные концентрации мелкодисперсной фракции аэрозоля $PM_{2.5}$ – 36,5 мкг/м³, PM_{10}

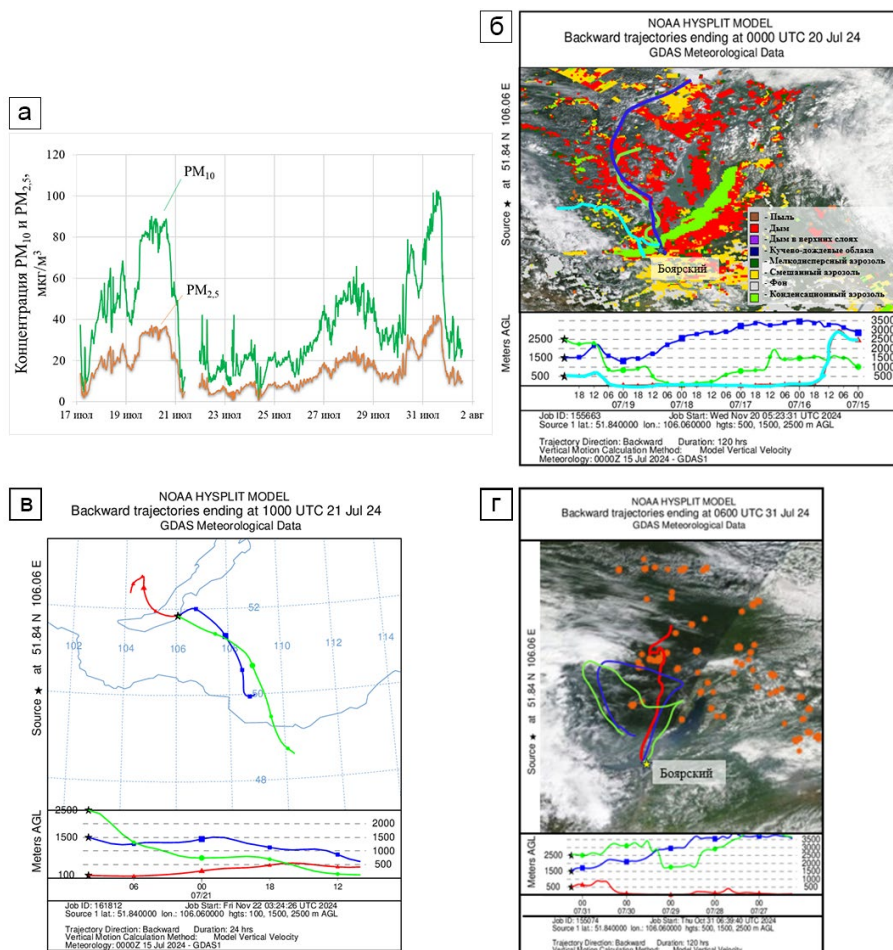


Рис.1. Временной ход массовой концентрации $PM_{2.5}$ и PM_{10} за период 17.07-01.08.2024 г. на ст. «Боярский»; б) космоснимок MODIS Deep Blue Aerosol Type и обратные траектории движения воздушных масс 19-20 июля; в) обратные траектории движения воздушных масс 21 июля; г) обратные траектории движения воздушных масс 31 июля по модели HYSPLIT.

– 87,6 мкг/м³ выявлены в период с 19 по 20 июля. 19 июля после 15 ч отмечен рост PM_{10} с 31 мкг/м³ до 87,6 мкг/м³ до 21 июля. По данным космоснимкам MODIS Deep Blue Aerosol Type видно, что преобладающим типом аэрозоля в дни наблюдений вокруг оз. Байкал преимущественно был дымовой аэрозоль (Рис. 1б). Расчет обратных траекторий показал, что перенос на высотах 1500-2500 м осуществлялся с севера и северо-запада. С 21 июля после 24 ч ночи отмечалось снижение концентраций РМ до 4 мкг/м³ при смене направления ветра на противоположный с северо-западного на юго-восточный (Рис. 1в). Аналогичная ситуация наблюдалась с 30 июля по 1 августа, когда концентрация $PM_{2.5}$ повысилась до 42 мкг/м³, PM_{10} до 104,4 мкг/м³. В эти дни пункт измерений находился под влиянием дымов лесных пожаров и одновременно на высотах 1500-2500 м отмечался перенос антропогенных примесей из Иркутской области (Рис. 1г).

В период исследований проводились измерения счетной концентрации субмикронного аэрозоля (СМА) с помощью диффузионного аэрозольного спектрометра ДАС 2702 М фирмы «АэроНаноТех», г. Москва. Результат измерений показал, что с 16 по 24 августа 2024 г. временной ход счетной концентрации СМА повторяет ход массовой концентрации аэрозоля фракции $PM_{2.5}$ и PM_{10} на ст. «Боярский». Как видно из рисунка 2 высокие концентрации

аэрозолей $PM_{2.5}$, PM_{10} и СМА наблюдались 16 и 20 августа на ст. «Боярский». Резкое повышение счетной концентрации субмикронного аэрозоля (СМА) до 150 см³ (Рис. 2б) и массовой концентрации PM_{10} до 95 мкг/м³ (Рис. 2а) в дневные часы свидетельствует о переносе дымового аэрозоля.

Анализ данных автоматизированной метеостанции АМК-03 и погодных карт, основанных на модели GFS (Глобальная система прогнозирования погоды, США, <https://www.wetter3.com>) показал, что основной причиной высоких концентраций аэрозолей 16 августа на юго-восточном побережье оз. Байкал являлся занос дымового аэрозоля при прохождении холодного антициклона с северо-востока из Якутии и Иркутской области (Рис. 3в,г,д). Понижение температуры воздуха 15 - 16 августа до 16-18°C (Рис. 3а,б) привело к росту концентраций взвешенных частиц $PM_{2.5}$ – 38,8 мкг/м³, PM_{10} – 95 мкг/м³ и СМА – 150 см³.

Проведены расчеты путей переноса воздушных масс с использованием траекторной модели HYSPLIT и расчет концентрации аэрозоля фракции $PM_{2.5}$ по химико-транспортной модели SILAM, разработанной Финским метеорологическим институтом и представленной в графическом виде на сайте Ventusky (<https://www.ventusky.com>) для выявления источника формирования повышенных концентраций аэрозоля $PM_{2.5}$ – 34,2 мкг/м³, PM_{10}

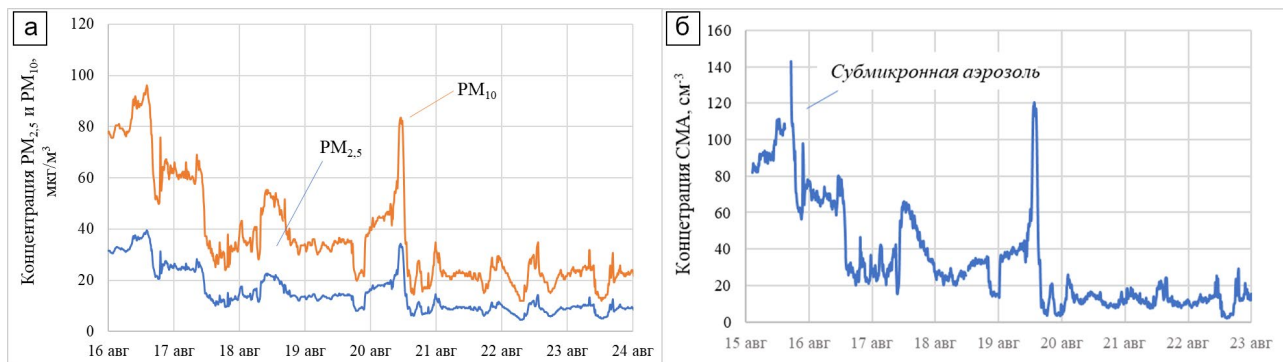


Рис.2. а) Временной ход массовой концентрации аэрозоля фракции $\text{PM}_{2.5}$ и PM_{10} ; б) счетная концентрация субмикронного аэрозоля на ст. «Боярский», 16-24 августа 2024 г.

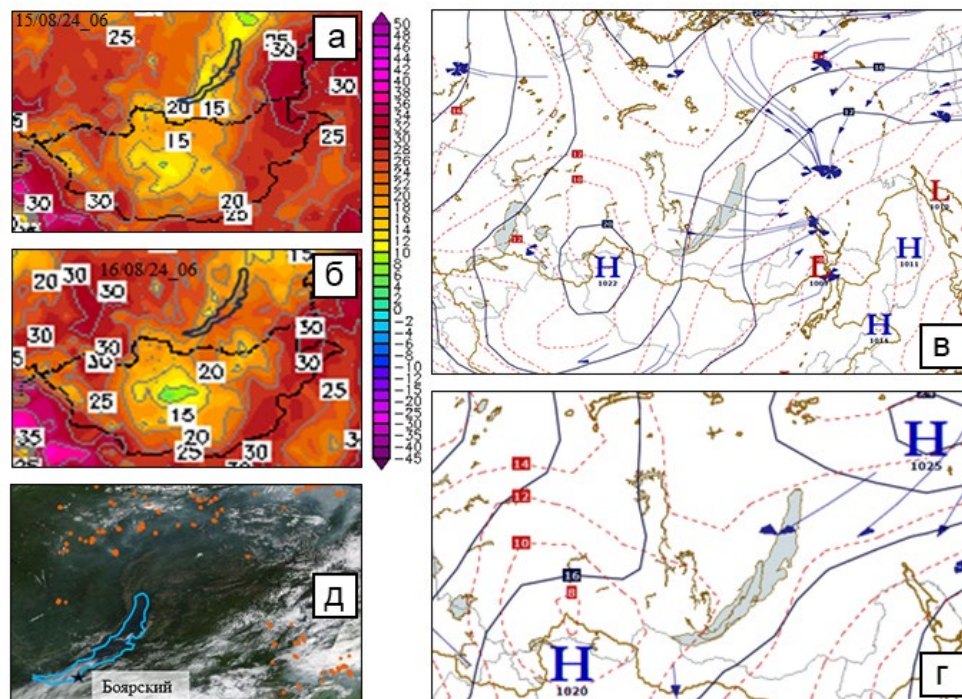


Рис.3. Погодная карта распределения температуры воздуха, 14-16 августа 2024 г.(а-в); Синоптическая ситуация над оз. Байкал, 15 августа (г), 16 августа 2024 г. (д); карта пожаров на 16 августа.

– 82,2 mg/m^3 и СМА – 120 cm^{-3} 20 августа 2024 г. на ст. «Боярский». В этот период на северо-востоке Республики Бурятия наблюдались лесные пожары, максимальная концентрация $\text{PM}_{2.5}$ составляла 100 mg/m^3 (Рис. 4). По расчетам обратных траекторий движения воздушных масс по модели HYSPLIT перенос дымового аэрозоля из очагов лесных пожаров Республики Бурятия на ст. «Боярский» осуществлялся на высотах 100 и 1000 м преимущественно в приземном слое атмосферы.

4. Заключение

Проведены комплексные исследования аэрозольного загрязнения атмосферы на научном стационаре «Боярский» весной-осенью 2024 г. За весь период измерений средняя массовая концентрация $\text{PM}_{2.5}$ составила 9,3 mg/m^3 и 23,1 mg/m^3 для PM_{10} . Основным фактором, влияющим на формирование состава аэрозолей в последние годы, является дымовая эмиссия от интенсивных лесных и торфяных пожаров на обширной территории Сибири.

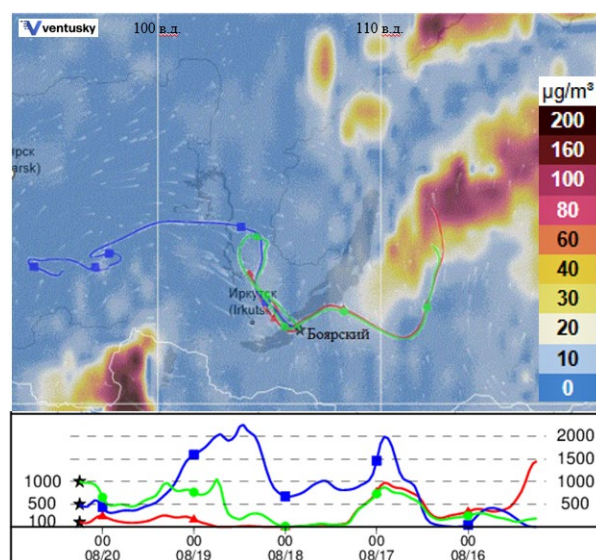


Рис.4. Пространственное распределение массовой концентрации аэрозоля фракции $\text{PM}_{2.5}$ по модели SILAM, 20 августа 2024 г., обратные траектории движения воздушных масс, HYSPLIT.

В случаях заноса дымового аэрозоля отмечено увеличение АОТ до 0,4-0,5 на длине волны 0,5 мкм в июле - августе 2024 г. В результате чего отмечается рост массовой концентрации $PM_{2,5}$ с 15 мкг/м³ до 35,5 мкг/м³ и PM_{10} с 31 мкг/м³ до 87,6 мкг/м³. Максимальные концентрации аэрозолей $PM_{2,5}$ - 42 мкг/м³, PM_{10} - 104,4 мкг/м³ зафиксированы 31 июля по 1 августа, 16 и 20 августа 2024 г. Анализ космоснимков MODIS MAIAC, Blue Aerosol Type с целью выявления типа аэрозолей и результаты расчетов обратных траекторий переноса воздушных масс по траекторной модели HYSPLIT позволили выявить источники происхождения аэрозолей в атмосфере. Результаты анализа показали, что главной причиной повышенных концентраций аэрозоля в июле на ст. «Боярский» является занос дымовых аэрозолей из очагов лесных пожаров в Иркутской области, Республики Бурятия и Якутии, а также перенос дымов промышленных выбросов со стороны долины Ангары при прохождении атмосферных фронтов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (средства бюджета ИФМ СО РАН в рамках Госзадания № 124041500027-2) в части научного оборудования и частично при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) в рамках научного проекта № 19-77-20058-П в части анализа и обработки данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

Anthropogenic and Natural Radiative Forcing, in Climate Change. 2013. The Physical Science Basis Cambridge Univ. Press, New York, USA. URL: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf (accessed on 02/07/2024)

Balin Yu.S., Klemasheva M.G., Kokhanenko G.P. et al. 2016. Lidar studies of the vertical structure of aerosol fields over Lake Baikal atmosphere during wildfires. *Atmospheric and oceanic optics* 29(8): 689–693. (in Russian)

Chen Y., Cao C., Cao Y. et al. 2021. Observed evidence of the growing contributions to aerosol pollution of wildfires with diverse spatiotemporal distinctions in China. *Journal of Cleaner Production* 298: 126860. DOI: [10.1016/j.jclepro.2021.126860](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126860)

Dementeva A., Zhamsueva G., Zayakhanov A. et al. 2022. Interannual and Seasonal Variation of Optical and Microphysical Properties of Aerosol in the Baikal Region. *Atmosphere* 13: 211. DOI: [10.3390/atmos13020211](https://doi.org/10.3390/atmos13020211)

Draxler R.R. 1999. HYSPLIT4 user's guide. NOAA Tech. Memo. ERL ARL-230, NOAA Air Resources Laboratory, Silver Spring, MD.

Gyawali M., Arnott W.P., Lewis K. et al. 2009. In situ aerosol optics in Reno, NV, USA during and after the summer 2008 California wildfires and the influence of absorbing and non-absorbing organic coatings on spectral light absorption. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9: 8007–8015.

Javed W., Guo B. 2021. Performance evaluation of real-time DustTrak monitors for outdoor particulate mass measurements in a desert environment. *Aerosol and Air Quality Research* 21(6): 200631. DOI: [10.4209/aaqr.200631](https://doi.org/10.4209/aaqr.200631)

Johnson M.S., Strawbridge K., Knowland K.E. et al. 2021. Long-range transport of Siberian biomass burning emissions to North America during FIREX-AQ. *Atmospheric Environment* 252: 118241. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2021.118241](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118241)

Khodzher T.V., Yausheva E.P., Shikhovtsev M.Y. et al. 2024. Black Carbon in the Air of the Baikal Region, (Russia): Sources and Spatiotemporal Variations. *Applied Science* 14(16): 6996. DOI: [10.3390/app14166996](https://doi.org/10.3390/app14166996)

Koulouri E., Saarikoski S., Theodosi C. et al. 2008. Chemical composition and sources of fine and coarse aerosol particles in the Eastern Mediterranean. *Atmospheric Environment* 42: 6542–6550. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2008.04.010](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.04.010)

Lin C.-A., Lu C.-H., Chen S.-P. et al. 2021. Characterization of intra-continental smoke transport and impact on New York State air quality using aerosol reanalysis and multi-platform observations. *Atmospheric Pollution Research* 12: 154–166. DOI: [10.1016/j.apr.2021.01.021](https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.01.021)

Moazami T.N., Svendsen K.H., Buhagen M. et al. 2022. Comparing $PM_{2,5}$, respirable dust, and total dust fractions using real-time and gravimetric samples in a human exposure chamber study. *Research Square*. PPR: PPR526390. DOI: [10.21203/rs.3.rs-1810629/v1](https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1810629/v1)

Ozdemir E., Gizem Tuna T., Tolga E. 2020. Application of aerosol classification methods based on AERONET version 3 product over eastern Mediterranean and Black Sea. *Atmospheric Pollution Research* 11: 2226–2243. DOI: [10.1016/j.apr.2020.06.008](https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.06.008)

Rupakheti D., Rupakheti M., Abdullaev S.F. et al. 2020. Columnar aerosol properties and radiative effects over Dushanbe, Tajikistan in Central Asia. *Environmental Pollution* 265: 114872. DOI: [10.1016/j.envpol.2020.114872](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114872)

Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D. et al. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96(12): 2059–2077. DOI: [10.1175/BAMS-D-14-00110.1](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1)

Youssouf H., Lioussé C., Roblou L. et al. 2014. Non-accidental health impacts of wildfire smoke. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 11: 11772–11804. DOI: [10.3390/ijerph11111772](https://doi.org/10.3390/ijerph11111772)

Zagainov V.A. 2006. Diffusion spectrometer for diagnostics of nanoparticles in the gas phase. *Nanotechnology* 1: 141–146.

Zhamsueva G., Zayakhanov A., Tsydypov V. et al. 2021. Spatial-Temporal Variability of Small Gas Impurities over Lake Baikal during the Forest Fires in the summer of 2019. *Atmosphere* 12(1): 20. DOI: [10.3390/atmos12010020](https://doi.org/10.3390/atmos12010020)

Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Starikov A.V. et al. 2024. Component Composition of Aerosols and their Dynamics in the Atmosphere of the Baikal South-Eastern Coast. *Aerosol and Air Quality Research* 24(2): 230161. DOI: [10.4209/aaqr.230161](https://doi.org/10.4209/aaqr.230161)