

Results of measurements of trace gaseous concentrations at the Boyarsky reference station for monitoring the atmosphere of the Baikal natural territory in 2024

Short communication

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGY

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

¹Institute of Physical Material Science Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Sahyanovoy Str., 6, Ulan-Ude, 670047, Russia

²Limnological Institute Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Batorskaya Str., 3, Irkutsk, 664033, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results of measurements of ground-level ozone, nitrogen oxide and dioxide, and sulfur dioxide concentrations in the atmosphere of the southeastern coast of Lake Baikal at the Boyarsky research station of the Institute of Physical Material Science Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPMS SB RAS). The features of the daily variation of small gaseous impurities in different seasons of the year are revealed. Seasonal variations of ground-level ozone, nitrogen oxide and dioxide, and sulfur dioxide concentrations were obtained. Periods with increased ground-level ozone concentrations were noted. It has been shown that high ozone levels may be associated with long-range transport from polluted areas of Mongolia and China.

Keywords: Small gaseous impurities, ground-level ozone, Lake Baikal, atmosphere, the Baikal natural territory, air pollution

For citation: Tcydypov V.V., Zhamsueva G.S., Zayakhanov A.S., Dementeva A.L., Balzhanov T.S., Starikov A.V., Khodzher T.M. Results of measurements of trace gaseous concentrations at the Boyarsky reference station for monitoring the atmosphere of the Baikal natural territory in 2024 // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 468-476. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-468

1. Introduction

Air pollution is now recognized as a global problem characterized by changes in atmospheric composition and elevated concentrations of air pollutants. According to the World Health Organization (WHO), outdoor air pollution in urban and rural areas caused 4.2 million premature deaths worldwide in 2019 (WHO, 2022). Ozone (O₃), as a secondary pollutant formed through photochemical reactions involving nitrogen oxides (NO_x) and volatile organic compounds (VOCs) under the influence of solar radiation, poses significant risks to human health, ecological systems (Lippmann, 1993; Burnett et al., 1997; Pacifico et al., 2015; Shikhovtsev et al., 2024) and vegetation (Rich, 1964; Fiscus et al., 2005; Felzer et al., 2007; Ainsworth et al., 2012); Sillman, 1999; Jaffe et al., 2008; Jaffe and Wigder, 2012; Lindaas et al., 2017).

The atmosphere is an important component of the natural environment and can have a significant

impact on the functioning of large terrestrial and aquatic ecosystems, in particular, such as Lake Baikal. In addition to the direct impact on currents and the intensity of vertical mixing of water masses, the atmosphere is a source of various natural and anthropogenic substances, both directly on the surface of the reservoir and on its catchment area (Zhamsueva et al., 2021).

In recent years, monitoring the entry of pollutants into the Baikal ecosystem through the atmosphere has become especially important due to climate change, an increase in the number and area of forest fires, which have a huge impact on its pollution.

In this regard, Lake Baikal is of particular interest for the implementation of digital monitoring methods and technologies, as an ideal place, since it can be characterized as representing natural conditions, but at the same time there are periods of anthropogenic impact due to the orographic isolation of the Baikal Basin and the specific nature of the circulation of air flows over the lake. The need to obtain information on modern

*Corresponding author.

E-mail address: tsydypov@inbox.ru (V.V. Tcydypov)

Received: June 26, 2025; **Accepted:** July 27, 2025;

Available online: August 31, 2025

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



climate changes in the Lake Baikal region, where they occur at an accelerated rate, makes this task important and relevant. In connection with the high spatio-temporal variability of meteorological conditions, the processes of distribution and fallout of anthropogenic impurities in the central ecological zone of Baikal, it is extremely important to use high-resolution automatic (in situ) methods of measuring both the pollutants themselves and meteorological parameters.

The study of this article focuses on complex observations of concentrations of trace gases at the Boyarsky reference station for monitoring the atmosphere of the Baikal natural territory. Air quality monitoring using continuous measurement systems allowed us to quantitatively determine the content of pollutants in the air and provide accurate information on their distribution in different seasons of the year.

2. Material and methods

The Boyarsky reference station (51°50'47"N; 106°04'01"E) is located in the "background" area, directly near the coastal zone of the south-eastern coast of Lake Baikal, along a transect covering the zone of transboundary transfer of anthropogenic emissions from the industrial centers of the Irkutsk region (Fig. 1).

The 3.02 P-A, P-310A, C-310A chemiluminescent gas analyzers (OPTEK Inc., St. Petersburg) were used to measure the concentrations of ozone, nitrogen oxides, and sulfur dioxide. The P-310A and C-310A gas analyzers measured the concentrations in the range from 0 to 1000 $\mu\text{g m}^{-3}$ with an error of $\pm 25\%$, and the 3.02 P-A gas analyzers in the range from 0 to 500 $\mu\text{g m}^{-3}$ with an error of $\pm 20\%$. Calibration and zeroing were performed automatically with the help of built-in micro-flux sources according to commands from gas analyzers' processor. The gas analyzer measurement accuracy is controlled using Mod. 8500 Monitor Labs calibrator (Monitor Labs. Inc., United States).

To assess possible sources of impurities entering the atmosphere of the central ecological zone of Lake Baikal and to visualize air transfers from large indus-

trial sources, the HYSPLIT mathematical model was used (Stein et al., 2015). For illustrate of data numeric model SILAM (System for Integrated modeLLing of Atmospheric coMposition) the Ventusky application (<https://www.ventusky.com>) are used.

3. Results and discussion

According to continuous observations at the Boyarsky reference station, seasonal variability in concentrations of small gaseous impurities was revealed. Figure 2 shows a histogram of the distribution of average monthly values of ground-level ozone, sulfur dioxide, and nitrogen oxides. The vertical lines in the diagrams show the standard deviation

In May the average monthly ozone concentrations were 116 $\mu\text{g/m}^3$, in June 96 $\mu\text{g/m}^3$, in July 100 $\mu\text{g/m}^3$, in August 105 $\mu\text{g/m}^3$, in September 63 $\mu\text{g/m}^3$, and in October 55 $\mu\text{g/m}^3$. Figure 2a demonstrates that the seasonal variability of ground-level ozone concentrations shows a pronounced maximum in the spring-summer period. In spring, due to increased vertical mixing and active ozone inflow from the free troposphere, the average monthly ground-level ozone concentrations reached 116 $\mu\text{g/m}^3$. The average monthly concentrations of nitrogen oxide and dioxide remained at the background level in all seasons and did not exceed 10 $\mu\text{g/m}^3$ (Fig. 2c,d).

On clear calm days the maximum concentration values of O_3 in July 31, in 08 August and 12 August were noted and amounted to 208 $\mu\text{g/m}^3$, 216 $\mu\text{g/m}^3$ and 234 $\mu\text{g/m}^3$, respectively. It was established that in the summer the maximum average daily concentrations of ozone were observed in the southwestern direction of the air masses, and the minimum average daily O_3 values occur in September and October. The main reason for the increased concentrations of ozone is apparently associated with the location of the Boyarsky station, which is located near the forest. The latter are a powerful source of generation of terpenes, of which ozone forms in natural conditions (Zayakhanov et al., 2022).

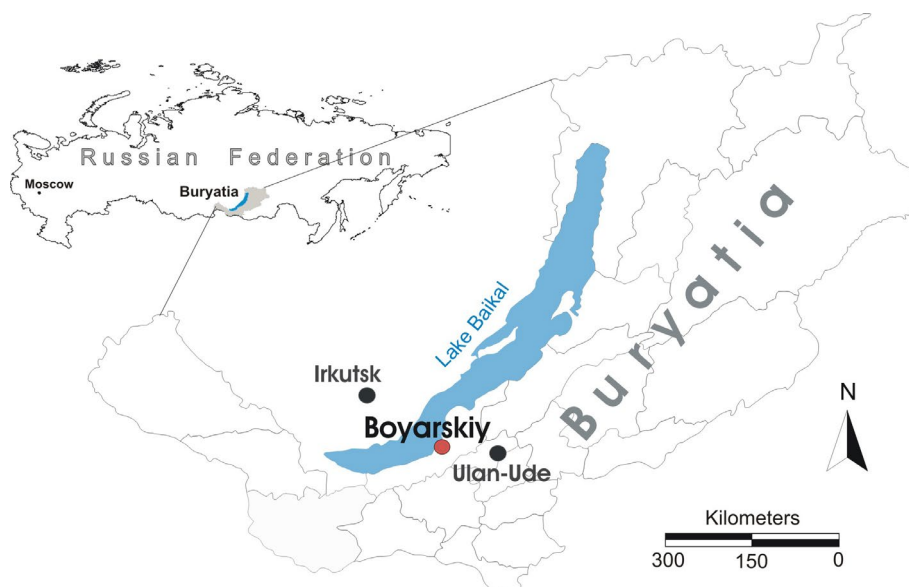


Fig.1. Location of the sampling station "Boyarskiy".

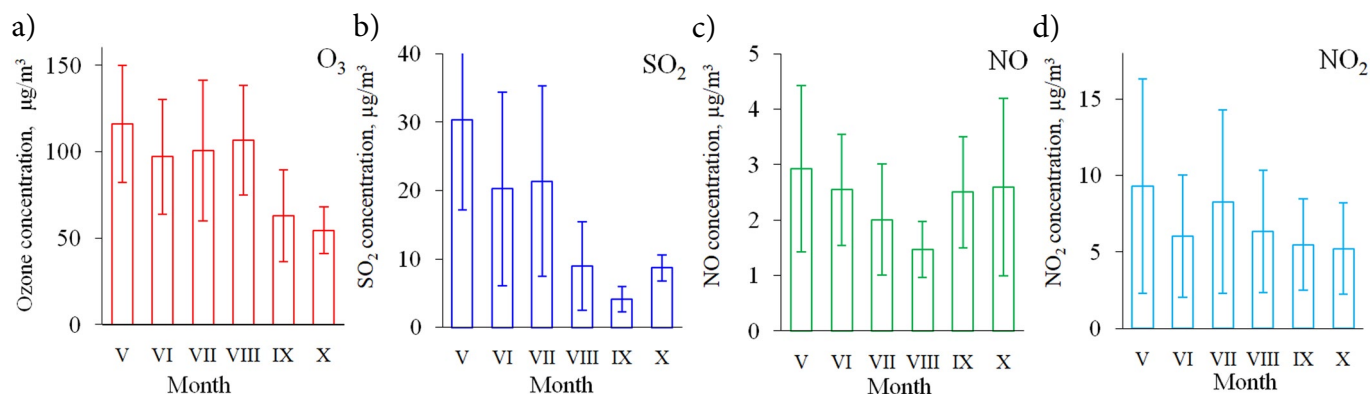


Fig.2. Temporal variability of monthly average concentrations of ground-level ozone (a), sulfur dioxide (b), nitrogen oxide (c), nitrogen dioxide (d); vertical lines show the standard deviation.

In the summer of 2024, the large-scale forest fires were observed in the Irkutsk region, the Krasnoyarsk territory and Yakutia. From July 27 to August 1 the increased levels of squirrel ozone were noted to 203 $\mu g/m^3$ due to the transfer of smokes from the fires area at the Boyarsky station. The maximum daily amplitude was observed in July and reached 120 $\mu g/m^3$, which can be associated with both photochemical processes (high daily temperatures and significant insolation) and the dynamics of the border layer (cold nights accompanied by strong inversions).

The daily variation of the concentrations of small gas impurities was obtained for each month of observation (Fig. 3). As in previous years, 2021-2023, the daily course of the concentration of ozone in all seasons of 2024 has a maximum in the daytime, at least at night and in the morning (Fig. 3a).

The daily variation of nitrogen oxide and dioxide concentrations in all seasons is weakly expressed (Fig. 3b,c). It was noted that the daily variation of SO_2 concentration in May, June and July repeats the daily variation of ozone. The correlation coefficient was 0.82.

In spring, the average daily concentrations of trace gases were SO_2 -30,1 $\mu g/m^3$, NO_2 - 8,7 $\mu g/m^3$, NO - 2,2 $\mu g/m^3$. The average daily ozone concentration in summer is noticeably lower than in spring. The amplitude of intra-day fluctuations varies in the range of 50-75 $\mu g/m^3$. The average concentrations of gas impurities in autumn (September-October) were for

O_3 -58,7 $\mu g/m^3$; SO_2 -6.3 $\mu g/m^3$, NO_2 - 5,4 $\mu g/m^3$, NO - 2,5 $\mu g/m^3$.

To assess the periods of exceeding hygienic standards, days with an excess of the maximum permissible single concentration (MPCm=160 $\mu g/m^3$) were identified; there were 28 of them, which is 29% of the total observation case. In 72% of cases, an excess of the maximum permissible average daily concentration (MPCd=100 $\mu g/m^3$) was noted. Increased O_3 concentrations can be associated, as noted above, with the location of the observation point on the border with a forest area, where an increased content of organic compounds of plant origin is usually observed, which participate in chemical reactions that contribute to an increase in ozone concentration. In addition, the high level is associated with the generation of ozone in polluted air during long-range transfer. As an example for assessing the contribution of long-range transfer to the observed extreme O_3 values on August 12, 2024 in the atmosphere of station. "Boyarsky", calculations of air mass transfer routes were performed using the HYSPLIT trajectory model and calculations using the SILAM (Fig. 4).

The calculation results are presented in the form of a map of the O_3 concentration distribution in Figure 4. It also shows the backward trajectories of air mass transfer calculated using the HYSPLIT model, which indicates the transfer of air masses from southwestern directions from the territories of Mongolia and China with a high content of ozone and anthropogenic gases.

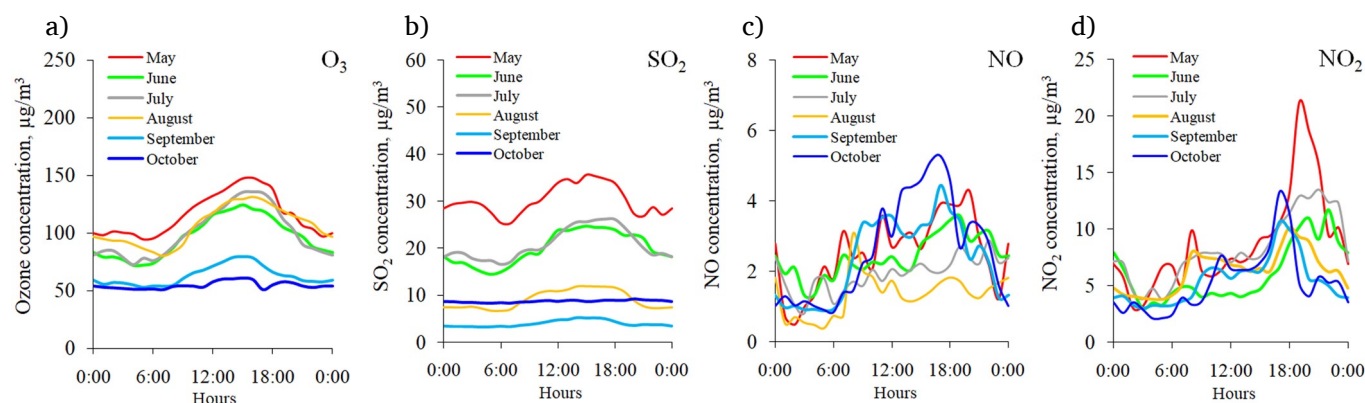


Fig.3. Daily variation of the concentrations O_3 (a), sulfur dioxide SO_2 (b), nitrogen oxide NO (c), nitrogen dioxide NO_2 (d) in different months 2024 the Boyarsky station.

4. Conclusion

Continuous measurements of ground-level ozone, nitrogen oxide and dioxide, and sulfur dioxide concentrations in the atmosphere of the southeastern coast of Lake Baikal were carried out at the Boyarsky reference station of the IPM SB RAS. Seasonal variations in trace gas impurities were obtained. The seasonal variability of ground-level ozone concentrations shows a pronounced maximum in the spring-summer period due to increased vertical mixing and active ozone inflow from the free troposphere. Concentrations of SO₂, NO₂, and NO remained at the background level in all seasons. The diurnal variation in trace gas impurity concentrations was obtained for each month of observations. The diurnal variation in O₃ concentrations in all seasons has a maximum in the daytime and a minimum at night and in the morning. The diurnal variation in nitrogen oxide and dioxide concentrations in all seasons is weakly expressed. Periods with increased ground-level ozone concentrations were noted. It has been shown that high ozone levels may be associated with long-range transport from polluted areas of Mongolia and China.

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the scientific topic project under State Assignment 124041500027-2 (organization of expeditionary research at the Boyarsky station) and RSF grant No. 19-77-20058 P (data analysis and processing).

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

References

- Ainsworth E.A., Yendrek C.R., Sitch S. et al. 2012. The effects of tropospheric ozone on net primary productivity and implications for climate change. *Annual Review of Plant Biology* 63: 637–661.
- Burnett R.T., Brook J.R., Yung W.T. et al. 1997. Association between ozone and hospitalization for respiratory diseases in 16 Canadian cities. *Environmental Research* 72 (1): 24–31.
- Felzer B.S., Cronin T., Reilly J.M. et al. 2007. Impacts of ozone on trees and crops. *Comptes Rendus Geoscience* 339 (11–12): 784–798.
- Fiscus E.L., Booker F.L., Burkey K.O. 2005. Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning. *Plant, Cell & Environ* 28 (8): 997–1011. DOI: [10.1111/j.1365-3040.2005.01349.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01349.x)
- Lindaas J., Farmer D.K., Pollack I.B. et al. 2017. Changes in ozone and precursors during two aged wildfire smoke events in the Colorado Front Range in summer 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17 (17): 10691–10707.
- Jaffe D., Chand D., Hafner W. et al. 2008. Influence of fires on O₃ concentrations in the western US. *Environmental Science & Technology* 42 (16): 5885–5891.
- Jaffe D.A., Wigder N.L. 2012. Ozone production from wildfires: a critical review. *Atmospheric Environment* 51: 1–10.

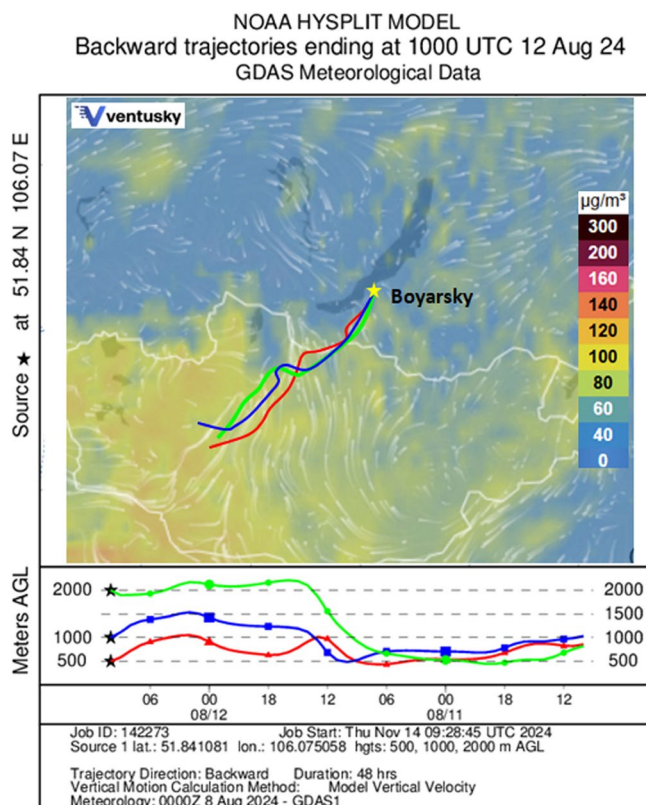


Fig.4. Spatial distribution of ground-level ozone concentration according to Ventusky application data on August 12, 2024, back trajectories (HYSPLIT model) for altitudes of 500 m, 1000 m and 2000 m.

Lippmann M. 1993. Use of human lung tissue for studies of structural changes associated with chronic ozone exposure: opportunities and critical issues. *Environmental Health Perspectives* 101 (Suppl. 4): 209–212.

Pacifico F., Folberth G.A., Sitch S. et al. 2015. Biomass burning related ozone damage on vegetation over the Amazon forest: a model sensitivity study. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15 (5): 2791–2804.

Rich S. 1964. Ozone damage to plants. *Annual Review of Phytopathology* 2 (1): 253–266.

Sillman S. 1999. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmospheric Environment* 33 (12): 1821–1845. DOI: [10.1016/S1352-2310\(98\)00345-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00345-8)

Shikhovtsev M.Y., Molozhnikova Y.V., Obolkin V.A. et al. 2024. Features of Temporal Variability of the Concentrations of Gaseous Trace Pollutants in the Air of the Urban and Rural Areas in the Southern Baikal Region (East Siberia, Russia). *Applied sciences* 14(18): 1–19. DOI: [10.3390/app14188327](https://doi.org/10.3390/app14188327)

Stein A., Draxler R., Rolph G. et al. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96: 2059–2077.

WHO. 2022. World Health Organization. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(out-door\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(out-door)-air-quality-and-health) (accessed on 02/07/2024).

Zhamsueva G., Zayakhanov A., Tcydypov 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)

Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Tcydypov V.V. et al. 2022. The results of synchronous measurements of ozone deposition fluxes in forest and grasslands in the coastal zone of the Lake Baikal. *Proceedings of SPIE* 12341: 123416G. DOI: [10.1117/12.2644918](https://doi.org/10.1117/12.2644918)

Результаты измерений концентраций малых газовых примесей на опорной станции мониторинга атмосферы Байкальской природной территории «Боярский» в 2024 г



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

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

² Лимнологический институт Сибирского Отделения Российской Академии Наук, ул. Улан-Баторская, 3, Иркутск, 664033, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе приведены результаты измерений концентраций приземного озона, оксида и диоксида азота, диоксида серы в атмосфере юго-восточного побережья оз. Байкал на научном стационаре «Боярский» ИФМ СО РАН. Выявлены особенности суточного хода малых газовых примесей в разные сезоны года. Отмечена важная роль в суточных вариациях озона и других малых газовых примесей смены воздушных потоков в условиях бризовых циркуляций, которые в значительной степени влияют на перенос и рассеяние атмосферных примесей в регионе.

Ключевые слова: Малые газовые примеси, приземный озон, оз. Байкал, атмосфера, Байкальская природная территория

Для цитирования: Цыдыпов В.В., Жамсуева Г.С., Заяханов А.С., Дементьева А.Л., Бальжанов Т.С., Стариков А.В., Ходжер Т.В. Результаты измерений концентраций малых газовых примесей на опорной станции мониторинга атмосферы Байкальской природной территории «Боярский» в 2024 г // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 468-476. DOI: 10.31951/2658-3518-2025-A-4-468

1. Введение

Загрязнение воздуха в настоящее время признается в качестве мировой проблемы, характеризующейся изменениями в составе атмосферы и повышенными концентрациями загрязняющих веществ в воздухе. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), загрязнение атмосферного воздуха в городах и сельской местности, стало причиной 4,2 миллиона преждевременных смертей во всем мире в 2019 году (ВОЗ, 2022). Озон (O_3), как вторичный загрязнитель, образующийся в результате фотохимических реакций с участием оксидов азота (NO_x) и летучих органических соединений (ЛОС) под действием солнечного излучения, представляет значительные риски для здоровья человека и экологических систем (Lippmann, 1993; Burnett et al., 1997; Pacifico et al., 2015; Shikhovtsev et al., 2024) и растительность (Rich, 1964; Fiscus et al., 2005; Felzer et al., 2007; Ainsworth et al., 2012; Sillman, 1999; Jaffe et al., 2008; Jaffe and Wigder, 2012; Lindaas et al., 2017).

Атмосфера является важной составляющей природной среды и может оказывать существенное влияние на функционирование крупных наземных и водных экосистем, в частности, таких как озеро Байкал. Помимо прямого влияния на течения и интенсивность вертикального перемешивания водных масс, атмосфера является источником поступления различных природных и антропогенных веществ, как непосредственно на поверхность водоема, так и на его водосборный бассейн (Zhamsueva et al., 2021).

В последние годы контроль за поступлением загрязняющих веществ в экосистему Байкала через атмосферу приобретает особое значение в связи с изменением климата, увеличением количества и площадей лесных пожаров, оказывающих огромное влияние на ее загрязнение.

В этом отношении оз. Байкал представляет особый интерес для внедрения методов и технологий цифрового мониторинга, как идеальное место, поскольку его можно охарактеризовать как

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: tsydygov@inbox.ru (В.В. Цыдыпов)

Поступила: 26 июня 2025; Принята: 27 июля 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

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



представляющий природные условия, но в тоже время здесь наблюдаются периоды антропогенного воздействия вследствие орографической изолированности Байкальской котловины и специфического характера циркуляции воздушных потоков над акваторией озера. Необходимость получения информации современных климатических изменений в регионе оз. Байкал, где они проходят ускоренно, делает данную задачу важной и актуальной. В связи с высокой пространственно-временной изменчивостью метеорологических условий, процессов распространения и выпадения антропогенных примесей в центральной экологической зоне (ЦЭЗ) Байкала, крайне важно применение высокоразрешающих автоматических (*in situ*) методов измерения, как самих загрязнителей, так и метеорологических параметров.

Исследование данной статьи сосредоточено на комплексных наблюдениях за концентрациями малых газовых примесей на опорной станции мониторинга атмосферы Байкальской природной территории «Боярский». Контроль качества воздуха с помощью систем непрерывного измерения позволил количественно определить содержание загрязняющих веществ в воздухе и предоставить точную информацию о их распределении в разные сезоны года.

2. Материалы и методы

Опорная станция «Боярский» (51°50'47"N; 106°04'01"E) расположена в «фоновом» районе, непосредственно вблизи береговой зоны юго-восточного побережья оз. Байкал, вдоль трансекты, охватывающей зону трансграничного переноса антропогенных выносов от промышленных центров Иркутской области (Рис. 1).

Для измерения концентрации озона, окислов азота, диоксида серы использовались хемилюминесцентные газоанализаторы 3.02 П-А, Р-310А, С-310А (ЗАО «ОПТЭК», г. Санкт-Петербург). Диапазон измерений газоанализаторов Р-310А, С-310А выполняемых с погрешностью $\pm 25\%$, составляет от 0 до 1000

мкг/м³, газоанализаторов 3.02 П-А от 0 до 500 мкг/м³, погрешность измерений $\pm 20\%$. Калибровка и установка нуля осуществляется автоматически при помощи встроенных источников микропотоков по командам процессора газоанализаторов. Контроль точности измерений газоанализаторов осуществляется с помощью калибратора Mod. 8500 Monitor Labs (Monitor Labs. Inc., США).

Для оценки возможных источников поступления примесей в атмосферу центральной экологической зоны Байкала и визуализации воздушных переносов от крупных промышленных источников использовалась математическая модель HYSPLIT (Stein et al., 2015). Для визуального отображения данных численного расчета состава атмосферы по модели SILAM (System for Integrated modelling of Atmospheric composition) использовалось приложение Ventusky (<https://www.ventusky.com>).

3. Результаты и обсуждение

По данным непрерывных наблюдений на опорной станции «Боярский» выявлена сезонная изменчивость концентраций газовых примесей. На Рисунке 2 представлена гистограмма распределения среднемесячных значений концентраций приземного озона, диоксида серы, окислов азота. На диаграммах вертикальными линиями показано среднеквадратическое отклонение.

Выявлены среднемесячные концентрации озона, которые составляла в мае 116 мкг/м³, в июне 96 мкг/м³, в июле 100 мкг/м³, в августе 105 мкг/м³, в сентябре 63 мкг/м³, в октябре 55 мкг/м³. Из Рисунка 2а видно, что в сезонной изменчивости концентрации приземного озона проявляется ярко выраженный максимум в весенне-летний период. Весной, благодаря усилению вертикального перемешивания и активному поступлению озона из свободной тропосферы, среднемесячные концентрации приземного озона достигали 116 мкг/м³. Среднемесячные концентрации оксида и диоксида азота во все сезоны оставались на фоновом уровне, и не превышали 10 мкг/м³ (Рис. 2 в,г).



Рис.1. Карта-схема расположение опорной станции «Боярский».

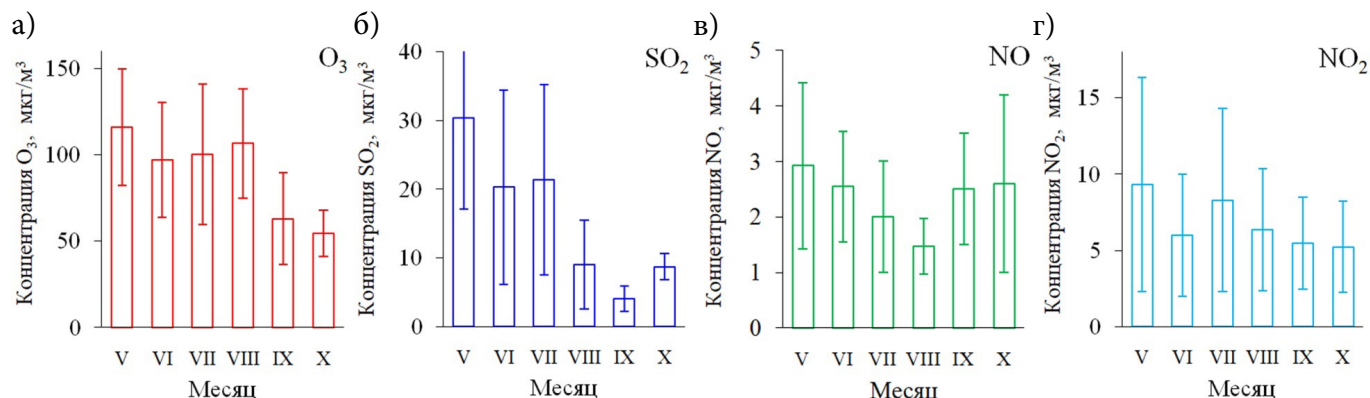


Рис. 2. Временной ход среднесуточных концентраций приземного озона (а), диоксида серы (б), оксида азота (в), диоксида азота (г), вертикальными линиями показано среднее квадратическое отклонение.

Отмечены максимальные значения концентрации O_3 31 июля, 08 августа и 12 августа в ясные безветренные дни и составляли 208 мкг/м³, 216 мкг/м³ и 234 мкг/м³, соответственно. Установлено, что летом максимальные среднесуточные концентрации озона наблюдались при юго-западном направлении воздушных масс, а минимальные среднесуточные значения O_3 приходятся на сентябрь и октябрь. Основная причина повышенных концентраций озона, по-видимому, связана с расположением стационара «Боярский», который находится вблизи лесного массива. Последние являются мощным источником генерации терпенов, из которых в естественных условиях и образуется озон (Zayakhanov et al., 2022).

Летом 2024 г. наблюдались крупномасштабные лесные пожары в Иркутской области, Красноярском крае и Якутии. Вследствие переноса дымов от очагов пожаров на стационаре «Боярский» с 27 июля по 1 августа отмечались повышенные уровни приземного озона до 203 мкг/м³. Максимальная амплитуда суточного хода наблюдалась в июле и достигала 120 мкг/м³, что может быть связано как с фотохимическими процессами (высокие дневные температуры и значительная инсоляция), так и с динамикой пограничного слоя (холодные ночи, сопровождающиеся сильными инверсиями).

Получен суточный ход концентраций малых газовых примесей для каждого месяца наблюдений

(Рис. 3). Как и в предыдущие годы 2021-2023 гг., суточный ход концентрации озона во все сезоны 2024 г. имеет максимум в дневные часы, минимум – ночью и утром (Рис. 3а).

Суточный ход концентраций оксида и диоксида азота во все сезоны слабо выражен (Рис. 3в,г). Отмечено, что суточный ход концентрации SO_2 в мае, июне и июле повторяет суточный ход озона (Рис. 3а,б). Коэффициент корреляции составил 0,82.

Весной среднесуточные концентрации малых газовых примесей составили SO_2 – 30,1 мкг/м³, NO_2 – 8,7 мкг/м³, NO – 2,2 мкг/м³. Среднесуточная концентрация озона летом заметно ниже, чем весной. Амплитуда внутрисуточных колебаний изменяется в диапазоне 50-75 мкг/м³. Средние концентрации газовых примесей осенью (сентябрь-октябрь) составили для O_3 – 58,7 мкг/м³; SO_2 – 6,3 мкг/м³, NO_2 – 5,4 мкг/м³, NO – 2,5 мкг/м³.

Для оценки периодов превышения гигиенических нормативов выявлены дни с превышением предельно допустимой максимально разовой концентрации озона (ПДК_{мр} = 160 мкг/м³). Таких дней было зафиксировано 28 дней, что составляет 29% от общего случая наблюдений. В 72% случаях отмечено превышение предельно допустимой среднесуточной концентрации (ПДК_{сс} = 100 мкг/м³). Повышенные концентрации O_3 могут быть связаны, как уже отмечалось выше, с расположением пункта наблюдения на границе с лесным массивом, где наблюдаются обычно повышенное содержание

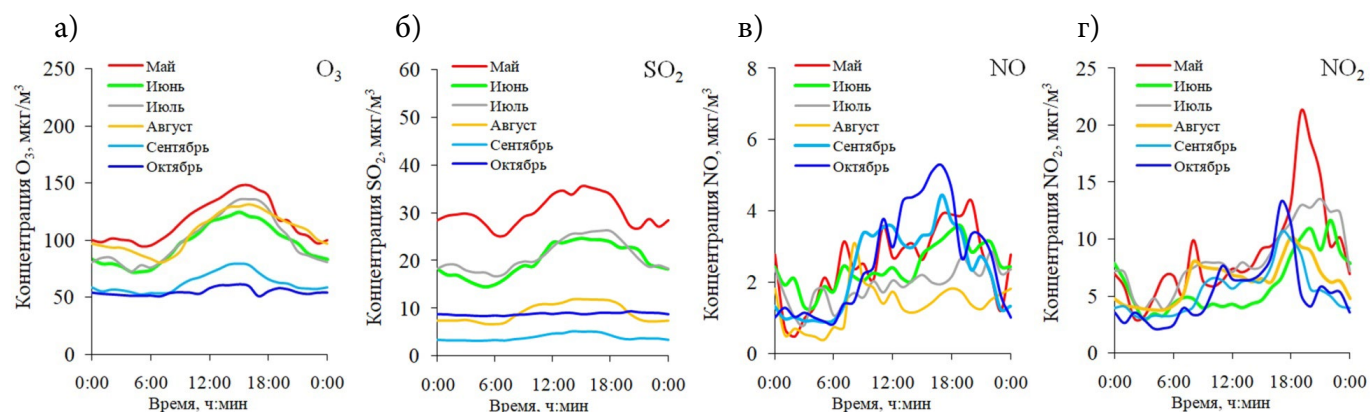


Рис. 3. Суточный ход концентраций озона O_3 (а), диоксида серы SO_2 (б), оксида азота NO (в), диоксида азота NO_2 (г) в разные месяцы 2024 г. на ст. «Боярский».

органических соединений растительного происхождения, которые участвуют в химических реакциях, способствующих росту концентрации озона. Кроме того, высокий уровень озона может быть связан с переносом из загрязненных районов. В качестве примера для оценки вклада дальнего переноса в наблюдаемые экстремальные значения O_3 12 августа 2024 г. в атмосфере ст. «Боярский», проведены расчеты путей переноса воздушных масс с использованием траекторной модели HYSPLIT и расчеты по химико-транспортной модели SILAM (Рис. 4).

Результаты расчета представлены в виде карты распределения концентрации O_3 на рисунке 4. Здесь же показаны обратные траектории переноса воздушных масс, рассчитанные по модели HYSPLIT, которые свидетельствуют о переносе воздушных масс с юго-западных направлений с территорий Монголии и Китая с высоким содержанием озона и антропогенных газов.

4. Заключение

Проведены непрерывные измерения концентраций приземного озона, оксида и диоксида азота, диоксида серы в атмосфере юго-восточного побережья оз. Байкал на опорной станции «Боярский» ИФМ СО РАН. Получены сезонные вариации малых газовых примесей. В сезонной изменчивости концентрации приземного озона проявляется ярко выраженный максимум в весенне-летний период за счет усиления вертикального перемешивания и активному поступлению озона из свободной тропосферы. Концентрации SO_2 , NO_2 и NO во все сезоны оставались на фоновом уровне. Получен суточный ход концентраций малых газовых примесей для каждого месяца наблюдений. Суточный ход концентрации O_3 во все сезоны имеет максимум в дневные часы, минимум – ночью и утром. Суточный ход концентраций оксида и диоксида азота во все сезоны слабо выражен. Отмечены периоды с повышенным содержанием концентраций приземного озона. Показано, что высокий уровень озона может быть связан с дальним переносом из загрязненных районов Монголии и Китая.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения проекта научной темы по Госзаданию 124041500027-2 (организация экспедиционных исследований на стационаре «Боярский») и гранта РНФ №19-77-20058 П (анализ и обработка данных).

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

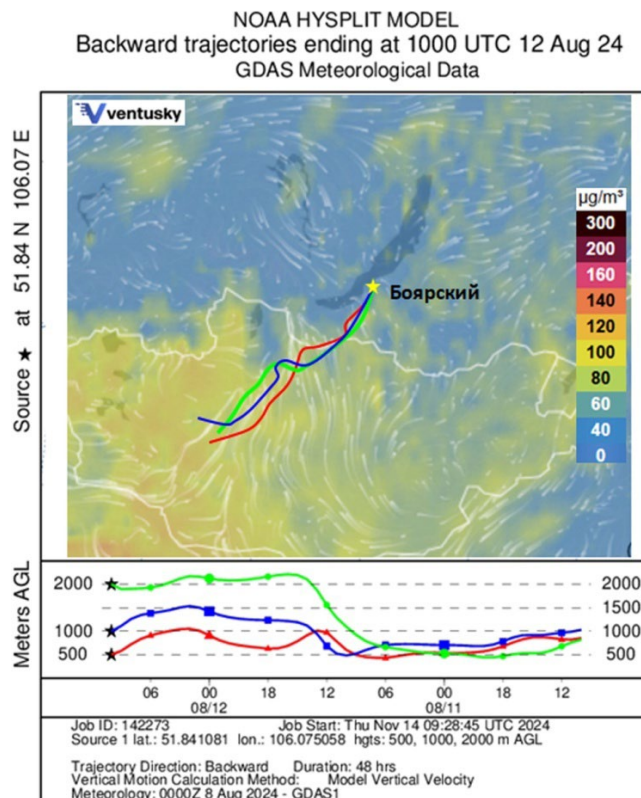


Рис.4. Пространственное распределение приземного озона по данным Приложения Ventusky на 12 августа 2024 г., обратные траектории (модель HYSPLIT) для высот 500м, 1000 м и 2000 м.

Список литературы

- Ainsworth E.A., Yendrek C.R., Sitch S. et al. 2012. The effects of tropospheric ozone on net primary productivity and implications for climate change. *Annual Review of Plant Biology* 63: 637–661.
- Burnett R.T., Brook J.R., Yung W.T. et al. 1997. Association between ozone and hospitalization for respiratory diseases in 16 Canadian cities. *Environmental Research* 72 (1): 24–31.
- Felzer B.S., Cronin T., Reilly J.M. et al. 2007. Impacts of ozone on trees and crops. *Comptes Rendus Geoscience* 339 (11–12): 784–798.
- Fiscus E.L., Booker F.L., Burkey K.O. 2005. Crop responses to ozone: uptake, modes of action, carbon assimilation and partitioning. *Plant, Cell & Environ* 28 (8): 997–1011. DOI: [10.1111/j.1365-3040.2005.01349.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01349.x)
- Lindaas J., Farmer D.K., Pollack I.B. et al. 2017. Changes in ozone and precursors during two aged wildfire smoke events in the Colorado Front Range in summer 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics* 17 (17): 10691–10707.
- Jaffe D., Chand D., Hafner W. et al. 2008. Influence of fires on O_3 concentrations in the western US. *Environmental Science & Technology* 42 (16): 5885–5891.
- Jaffe D.A., Wigder N.L. 2012. Ozone production from wildfires: a critical review. *Atmospheric Environment* 51: 1–10.
- Lippmann M. 1993. Use of human lung tissue for studies of structural changes associated with chronic ozone exposure: opportunities and critical issues. *Environmental Health Perspectives* 101 (Suppl. 4): 209–212.

Pacifico F., Folberth G.A., Sitch S. et al. 2015. Biomass burning related ozone damage on vegetation over the Amazon forest: a model sensitivity study. *Atmospheric Chemistry and Physics* 15 (5): 2791–2804.

Rich S. 1964. Ozone damage to plants. *Annual Review of Phytopathology* 2 (1): 253–266.

Sillman S. 1999. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmospheric Environment* 33 (12): 1821–1845. DOI: [10.1016/S1352-2310\(98\)00345-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00345-8)

Shikhovtsev M.Y., Molozhnikova Y.V., Obolkin V.A. et al. 2024. Features of Temporal Variability of the Concentrations of Gaseous Trace Pollutants in the Air of the Urban and Rural Areas in the Southern Baikal Region (East Siberia, Russia). *Applied sciences* 14(18): 1-19. DOI: [10.3390/app14188327](https://doi.org/10.3390/app14188327)

Stein A., Draxler R., Rolph G. et al. 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of the American Meteorological Society* 96: 2059–2077.

WHO. 2022. World Health Organization. URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (accessed on 02/07/2024).

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)

Zayakhanov A.S., Zhamsueva G.S., Tsydypov V.V. et al. 2022. The results of synchronous measurements of ozone deposition fluxes in forest and grasslands in the coastal zone of the Lake Baikal. *Proceedings of SPIE* 12341: 123416G. DOI: [10.1117/12.2644918](https://doi.org/10.1117/12.2644918)