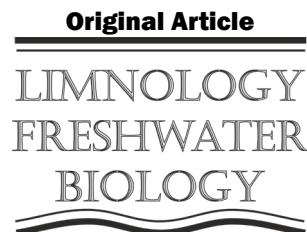


Greenhouse gas fluxes (CH₄, CO₂) from the Kuibyshev Reservoir: an eddy covariance study



Nikitin O.V.^{1*}, Stepanova N.Yu.², Aukhadeev T.R.², Latypova V.Z.²

¹Ekoaudit LLC, Sechenov Str., 17, Kazan, 420061, Russia

²Kazan Federal University, Kremlyovskaya Str., 18, Kazan, 420008, Russia

ABSTRACT. The study presents the results of evaluating greenhouse gas fluxes (methane and carbon dioxide) from the surface of the Kuibyshev Reservoir (Russia) using the eddy covariance method along with the LI-7700 (CH₄) and LI-7200RS (CO₂/H₂O) gas analyzers. Measurements were conducted from August to December 2024 in a shallow section (2–4 m) of the reservoir within the water cluster of the Volga Carbon Polygon (Republic of Tatarstan, Russia). The results showed that the reservoir is a source of methane and carbon dioxide, with maximum emissions observed in August–September (52.84 ± 22.49 and 47.53 ± 27.06 mg CH₄ m⁻²·day⁻¹; 2.32 ± 1.70 and 2.54 ± 1.75 g CO₂ m⁻²·day⁻¹, respectively). At the same time, significant daily CO₂ uptake was also recorded in August–September, driven by the photosynthetic activity of phytoplankton. In autumn, alongside emission, occasional methane flux from the atmosphere into the water column was recorded. During winter, gas exchange was minimized due to the ice cover. Seasonal variability of the fluxes is determined by a combination of biological processes (methane production and oxidation, photosynthesis), physical factors (water temperature, concentration gradients, turbulent mixing), and meteorological conditions (wind impact, ice cover formation). The eddy covariance method enables continuous data collection with high temporal resolution and accounts for the spatial heterogeneity of the water surface. The obtained data are important for refining the contribution of reservoirs to the regional carbon balance and global carbon cycle and demonstrate the advantages of using the eddy covariance method in such studies.

Keywords: greenhouse gases, methane, carbon dioxide, eddy covariance, Kuibyshev Reservoir, Volga Carbon Polygon

For citation: Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Aukhadeev T.R., Latypova V.Z. Greenhouse gas fluxes (CH₄, CO₂) from the Kuibyshev Reservoir: an eddy covariance study // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - P. 995-1012. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-4-995](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-4-995)

1. Introduction

Reservoirs play a crucial role in the structure of modern landscapes, serving a wide range of functions, including hydropower generation, water resource management, flood control, water supply, recreation, and navigation (Lehner et al., 2011; Deemer et al., 2016). In addition, they contribute significantly to maintaining ecological functions, such as regulating hydrological processes, preserving biodiversity, and participating in the cycling of nutrients. In the context of the carbon cycle, reservoirs are both carbon sinks and sources, influencing local and global biogeochemical processes. They are involved in the processing of both allochthonous organic matter that enters from the watershed and autochthonous matter formed within the reservoir as a result of the activities of aquatic organisms and the

decomposition of detritus. These substances undergo physico-chemical and biological transformations, producing carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄), which significantly affect the global greenhouse gas budget (Louis et al., 2000; Barros et al., 2011; Bastviken et al., 2011; Varis et al., 2012; Deemer et al., 2016; Hamdan and Wickland, 2016; Beaulieu et al., 2020; Johnson et al., 2021; Martínez-García et al., 2024; Nikitin et al., 2024c). Recent studies show that methane produced in aquatic systems can exceed the volume of direct anthropogenic emissions, including those from agriculture and fossil fuel use. Collectively, aquatic ecosystems, including wetlands, are responsible for at least half of the global CH₄ emission budget (Rosentreter et al., 2021). The assessment of greenhouse gas (GHG) emissions and uptake from the surface of reservoirs is a key element for understanding their contribution to

*Corresponding author.

E-mail address: olnova@mail.ru (O.V. Nikitin)

Received: August 02, 2025; **Accepted:** August 19, 2025;

Available online: August 31, 2025

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



the global carbon cycle, as well as for developing effective measures to mitigate the impacts of climate change (Goldenfum, 2010; Shahady, 2024).

Water bodies, including reservoirs, are complex ecosystems where GHG emissions are determined by a variety of factors, including hydrological, biogeochemical, and climatic conditions. The diversity of processes occurring in these ecosystems requires the use of comprehensive assessment methods capable of accounting for both global trends and local characteristics (Harrison et al., 2021). In modern practice, three main approaches are distinguished: top-down (downward modeling), bottom-up (upward modeling), and hybrid, which combines elements of both approaches (IPCC, 2006; Nicholls et al., 2015; Flerlage et al., 2021; Ma et al., 2021; Erland et al., 2022; Zhang et al., 2023; Semerjian et al., 2024).

The bottom-up approach is based on local measurements and a detailed study of the processes occurring at the level of individual water bodies. This method involves the use of field data and parameterization of mechanisms such as organic matter input and decomposition, methanogenesis and methanotrophy, respiration and photosynthesis, among others, to estimate GHG emissions and sinks (Berberich et al., 2019; Isidorova et al., 2019; Thottathil et al., 2019; Gruca-Rokosz and Cieřla, 2021; Moras et al., 2024). Methods for measuring CH_4 and CO_2 fluxes within this approach include the use of stationary or drifting floating chambers (FC), inverted funnels, echo sounders, thin boundary layer (TBL) models, or eddy covariance (EC), which provide accurate data on gas exchange at the water-atmosphere interface (Schubert et al., 2012; Podgrajsek et al., 2014a; Lorke et al., 2015; Erkkilä et al., 2018; Lomov, 2021; Yang et al., 2021; Hounshell et al., 2023; Liu et al., 2023; Thirkill et al., 2024). Additionally, local models based on biogeochemical processes use data on the intensity of organic matter influx into the water body, temperature, pH level, oxygen content, and other characteristics that determine the intensity of GHG fluxes (Stepanenko et al., 2011; 2016; Iakunin et al., 2020; Lomov et al., 2024).

The main advantage of the bottom-up approach is its high accuracy, achieved by considering the specific conditions of individual water bodies, such as local hydrodynamics, sediment structure, or microbiological activity. This makes it particularly effective for estimating emissions at the level of individual water bodies or limited areas where a high degree of detail is required. Furthermore, the method allows for accounting for the specific functioning of ecosystems and can be flexibly adapted to the characteristics of each water body (Waldo et al., 2021; Naslund et al., 2024). However, this approach also has its limitations. It requires significant time and financial resources for field studies, as well as complex and labor-intensive data analysis. The application of this method in large water bodies is complicated by the need to scale the results, and seasonal and interannual variability of processes may introduce additional challenges in interpreting the results. Despite these limitations, the bottom-up approach remains an indispensable tool for detailed studies of greenhouse gas fluxes and the development of local models, mak-

ing it a key component of comprehensive assessments of emissions and sinks from water bodies.

The eddy covariance method is a modern and highly accurate tool for quantifying gas exchange between the surface of water bodies and the atmosphere (Berg et al., 2020). The method is based on the measurement of instantaneous fluctuations in the vertical component of wind velocity and the concentration of the target gas (Burba et al., 2016). Analysis of the joint time series of these parameters enables the determination of gas fluxes driven by turbulent transport, making this approach one of the most effective and informative tools for investigating greenhouse gas emissions from aquatic surfaces (Waldo et al., 2021; Long, 2021).

The primary advantage of the eddy covariance method lies in its ability to provide continuous and automated monitoring of gas fluxes over time scales ranging from minutes to entire seasons, yielding data with high temporal resolution. Moreover, the method allows for the estimation of integrated fluxes over large spatial scales, eliminating the need for localized measurements (Morin et al., 2014). This is particularly important for assessing fluxes over heterogeneous surfaces, where local techniques such as floating chambers may provide only limited insights. However, the application of the eddy covariance method involves several technical and methodological challenges. On water bodies, measurement accuracy can be reduced due to low wind speeds, turbulent effects from surrounding vegetation, as well as the influence of thermal stratification and micro-meteorological conditions. Successful implementation of the method requires careful instrument calibration, monitoring of measurement conditions, and the application of data filtering techniques to exclude noise and artifacts (Vesala et al., 2012; Burba et al., 2016; Burba, 2022).

Despite its limitations, the eddy covariance method is widely employed in ecological and climate research due to its versatility, high accuracy, and ability to provide real-time data. Incorporating results obtained using eddy covariance into regional and global greenhouse gas emission models contributes to a more accurate assessment of the carbon cycle and the role of aquatic systems in climate processes (Huotari et al., 2011; Baldocchi et al., 2020; Scholz et al., 2021; Golub et al., 2023).

The objective of this study is a quantitative assessment of methane and carbon dioxide fluxes from the surface of the Kuibyshev Reservoir using the eddy covariance method.

2. Materials and Methods

The Kuibyshev Reservoir is located in the Middle Volga and Lower Kama regions of the European part of Russia. It was created between 1955 and 1957 during the construction of the Zhiguli Hydroelectric Station dam (formerly the Kuibyshev Hydroelectric Station) on the Volga River near Zhigulevsk and Tolyatti in the Samara Oblast. The Kuibyshev Reservoir is the largest in the Volga-Kama cascade and one of the largest reservoirs in the world. It covers an area of 5,900 km² and has a total volume of 57.3 km³. The reservoir's water

area has a complex configuration: extensive lake-like sections (15–20 km wide) alternate with narrow straits, whose width does not exceed 3–5 km throughout its length (Nikitin et al., 2024a).

GHG fluxes were measured in the water area of the Volga Carbon Polygon (Nikitin et al., 2022; Latypova et al., 2023) from 7 August to 16 December 2024. The site consists of an open shallow section of the Kuibyshev Reservoir with depths ranging from 2 to 4 m (Gafurov et al., 2024). The site is bounded to the north by the shoreline and to the south by a semi-circular elongated island, representing the remnants of ridge elevations of the flooded Volga River floodplain.

The primary equipment used for measurements included an open-path infrared gas analyzer LI-7700 (CH_4) and a closed-path LI-7200RS gas analyzer ($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$) (LI-COR, USA), as well as a three-dimensional (3D) ultrasonic anemometer uSonic-3 Cage MP (Metek, Germany). The equipment was mounted on a stationary anchored pontoon (55°16'09.9"N, 49°16'48.6"E) approximately 2 m above the water surface (Fig. 1). The use of a floating platform compensating for water level fluctuations ensured a constant height of the EC system above the surface throughout the observation period. The sensor installation height reflects a balance between maintaining adequate frequency response for capturing turbulent eddies and the measurement footprint, which represents the area of interest within the water body (Burba, 2022). For this site, the potential footprint of the measurements was predominantly over the water surface (85–100%, depending on wind direction and speed) (Sogachev et al., 2024). To measure net radiation (R_g , $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), a 4-component radiometer CNR4 (Kipp & Zonen, Netherlands) with heating and ventilation modules was used. Air temperature and humidity were measured using a combined HMP155 sensor (Vaisala, Finland).

Measurements were conducted at a frequency of 10 Hz and recorded using a data logger (LI-7550 interface module and SMARTFlux 2 data processing module, LI-COR, USA). The raw 10 Hz data were processed into 30-minute flux averages using EddyPro 7 software (LI-COR, USA). Post-processing, filtering, and gap-filling were performed using the specialized REdyProc package in the R software environment. Further statistical analysis was conducted using Statistica 10 (StatSoft,

USA). Outliers exceeding three times the standard deviation were filtered from the total dataset of 30-minute flux values. The remaining data were averaged daily, with daytime ($R_g > 0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) and nighttime ($R_g \leq 0 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$) periods separated, and then aggregated monthly.

The results are presented as the mean $\pm$ standard deviation (Mean $\pm$ SD). In the figures, the median is also shown for visualizing the data distribution. For interpreting the direction of fluxes, the following convention was used: positive values correspond to GHG emissions from the water surface to the atmosphere, while negative values represent sinks from the atmosphere to the water.

3. Results and Discussion

During the observation period, the typical air temperature pattern for the region was recorded (Fig. 2), with daily mean values ranging from $18.8 \pm 2.7^\circ\text{C}$ in August to $-3.5 \pm 3.5^\circ\text{C}$ in December. Net radiation (R_g) also exhibited distinct seasonal dynamics (Fig. 3): daily values ranged from a peak of $861 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ in August to just $183 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ in December, reflecting changes in daylight hours and cloud cover.

The results of the conducted EC observations show that the studied area of the Kuibyshev Reservoir is generally a source of greenhouse gases (Fig. 4–6). However, the emission patterns of carbon dioxide and methane exhibit distinct characteristics. In the case of methane, the water surface typically remains a consistent source of the gas regardless of the time of day. According to the literature, peak CH_4 fluxes can occur either during nighttime (Podgrajsek et al., 2014b) or daytime (Morin et al., 2014). In some cases, diurnal variations are weak or inconsistent, with dominance alternating between night and day, and the underlying patterns remaining unclear (Waldo et al., 2021).

In our observations (Fig. 4), the highest methane emission was recorded during daytime in August at $0.71 \pm 0.45 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (compared to $0.44 \pm 0.35 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ at night), whereas in September slightly higher emissions were observed at night – $0.59 \pm 0.53 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ versus $0.56 \pm 0.57 \mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ during the day. During the remaining months, methane emissions during day and night remained at similarly low levels, with average values close to zero.



Fig.1. Floating platform equipped for greenhouse gas flux measurements using the eddy covariance method in the Kuibyshev Reservoir (<https://kpfu.ru/ecology/karbon-povolzhe>, photo: V.E. Prokhorov).

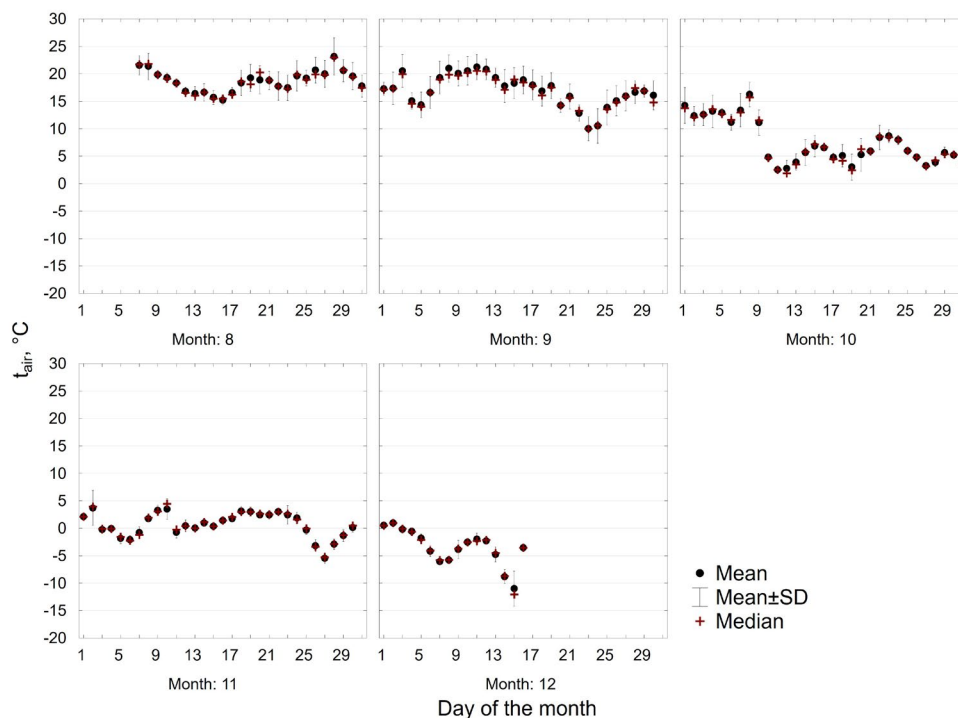


Fig.2. Dynamics of daily mean surface air temperature (t_{air} , °C) over the observation period.

A different pattern is observed for carbon dioxide (Podgrajsek et al., 2015; Bauduin et al., 2025): during daytime hours, due to the phytoplankton photosynthetic activity, the reservoir may act as a sink, absorbing CO_2 . This effect is most pronounced during the summer months, when photosynthesis intensity peaks (Scholz et al., 2021; Golub et al., 2023). Similar processes, where algal productivity effectively leads to carbon dioxide sequestration, have been documented in various reservoirs worldwide (Pilla et al., 2024). However, it is important to emphasize that such diurnal dynamics

are not solely driven by biological processes but also depend on the micrometeorological and hydrodynamic conditions of the reservoir (Eugster et al., 2003). A comparable pattern was observed in the Kuibyshev Reservoir (Fig. 5). In August and September, nighttime CO_2 emissions prevailed, amounting to 59.79 and 58.07 $\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, respectively, compared to daytime fluxes of 2.64 and 1.91 $\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. In October, this difference decreased, with emission rates of 21.14 $\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ at night and 7.33 $\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ during the day. During the remaining two months, CO_2 fluxes were

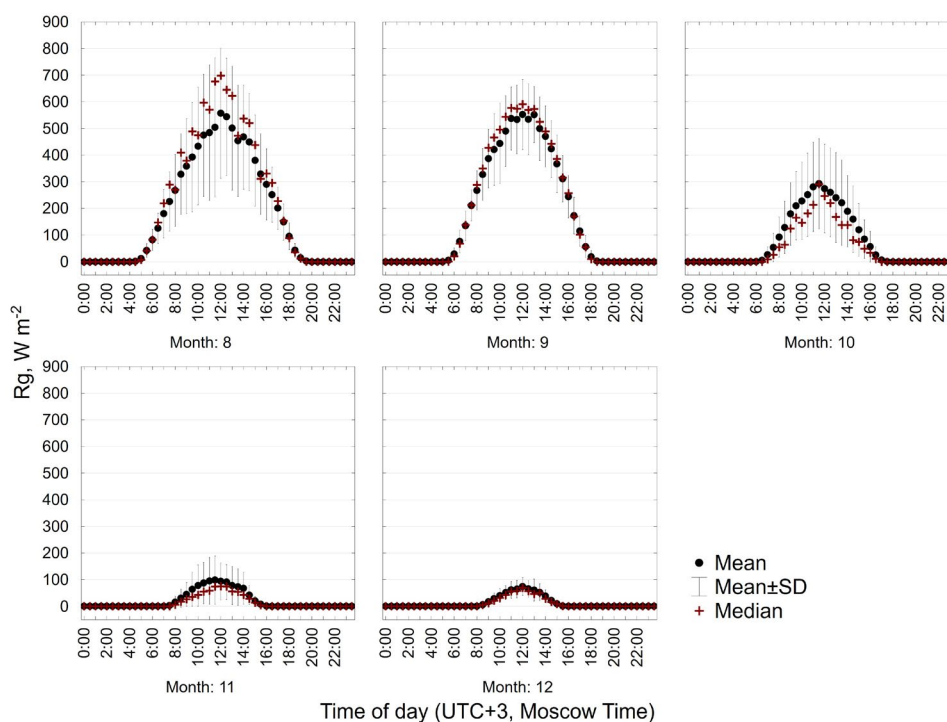


Fig.3. Daily dynamics of net radiation (R_g , W m^{-2}) by month during the observation period.

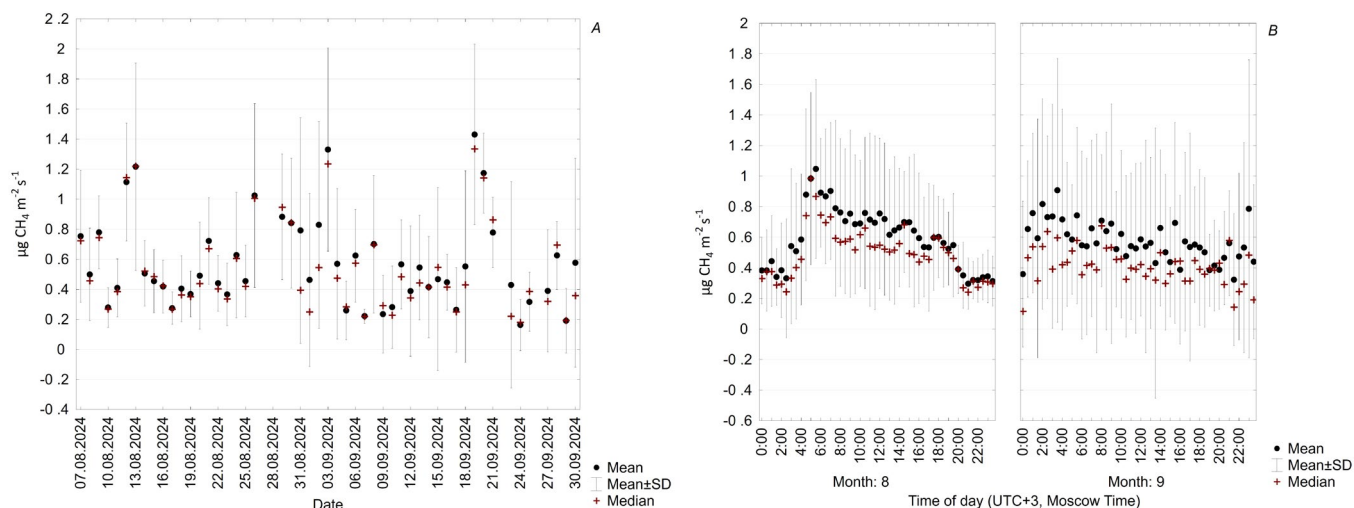


Fig.4. Assessment of daily (A) and diurnal (B) methane fluxes ($\mu\text{g CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) measured by the eddy covariance method in the water area of the Volga Carbon Polygon (August–September 2024).

at comparable levels during both day and night. From August to December, the mean monthly CO_2 emission progressively declined from maximum values to nearly zero, with the following sequence: 2.32 ± 1.70 , 2.54 ± 1.75 , 1.37 ± 0.68 , 0.52 ± 0.42 , and $0.10 \pm 0.23 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, respectively (Fig. 6). These results are consistent with previous modeling-based estimates of CO_2 emissions from the Kuibyshev Reservoir ($1.34 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$; Nikitin et al., 2025a) and align with the ranges reported in the literature for mesotrophic to eutrophic reservoirs, where average CO_2 emissions range from 1.20 to $1.41 \text{ g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (Deemer et al., 2020).

The seasonal dynamics of methane fluxes from the reservoir surface show a positive flux in August and September (Fig. 6). During these months, the highest CH_4 emissions were recorded: the mean flux reached $52.84 \pm 22.49 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ in August and $47.53 \pm 27.06 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ in September. These results generally agree with methane flux estimates obtained for this section of the reservoir using the floating chamber method (July–September 2024), which showed fluxes from the water surface ranging from 0 to $74.1 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, with an average of $22.9 \pm 16.2 \text{ mg CH}_4$

$\text{m}^{-2} \text{ day}^{-1}$ (Nikitin et al., 2025b). The findings also align with field observations from other reservoirs within the Volga-Kama cascade (Grechushnikova et al., 2023).

The summer and early autumn periods are characterized by elevated water temperatures (Latypova et al., 2023; Nikitin et al., 2025b), which enhance microbial methane production in anaerobic bottom waters and sediments. Elevated temperatures also promote CH_4 diffusion from water to the atmosphere due to increased turbulence in the surface water layer, while thermal mixing and wind-driven surface agitation contribute to efficient turbulent transport of CH_4 to the water–air interface. This leads to increased methane emissions from the water to the atmosphere. Similar seasonal patterns have been observed in other freshwater systems worldwide (Huotari et al., 2011; Jensen et al., 2022; Hounshell et al., 2023), where peak greenhouse gas emissions also occur from late summer to early autumn. This may represent a characteristic pattern for freshwater bodies in temperate climates.

In the late autumn period (October–November), negative methane flux values were recorded in some cases, which could indicate the possibility of short-term transfer of gas from the atmosphere to the res-

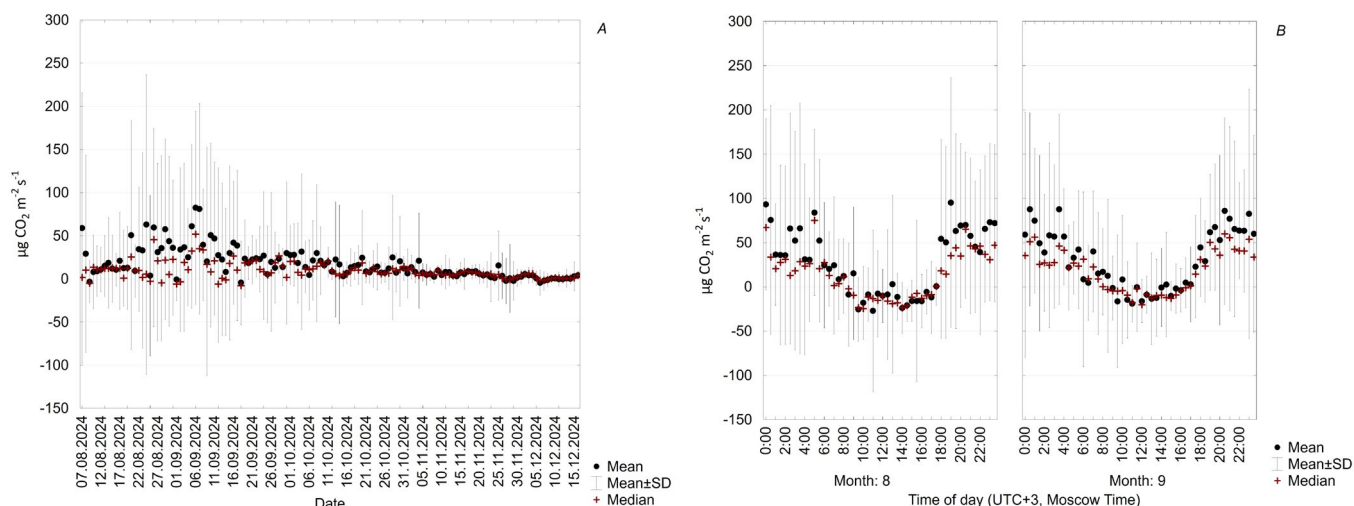


Fig.5. Assessment of daily (A) and diurnal (B) carbon dioxide fluxes ($\mu\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) measured by the eddy covariance method in the water area of the Volga Carbon Polygon (August–December 2024).

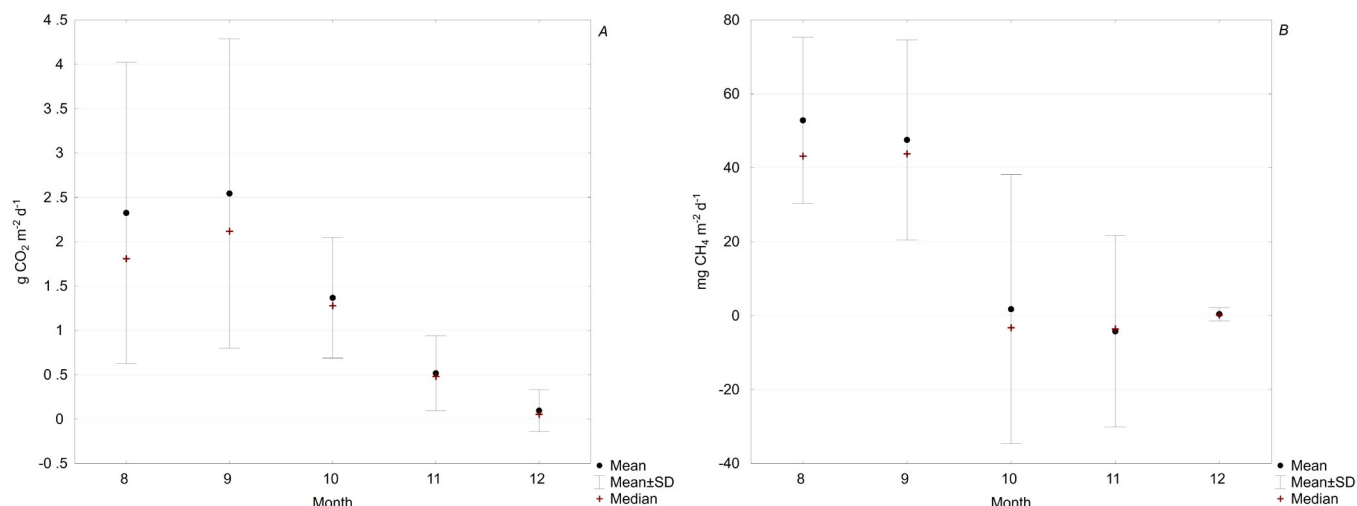


Fig.6. Assessment of monthly mean GHG (carbon dioxide (A), $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$; methane (B), $\text{mg CH}_4 \text{ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$) using the eddy covariance method in the water area of the Volga Carbon Polygon from August to December 2024. The CH_4 flux data for October and November should be interpreted with caution due to increased measurement uncertainty (see explanations in the text).

ervoir. However, interpreting these data requires caution, as the observed pattern could reflect both real gas exchange processes and methodological peculiarities of the measurements. Similar phenomena, although mentioned in the literature when using the eddy covariance method (Schubert et al., 2012; Erkkilä et al., 2018), require thorough analysis, especially in the absence of direct data on the partial pressure of CH_4 in both the atmospheric and water layers.

On one hand, the possibility of a short-term methane flux from the atmosphere cannot be ruled out, related to the seasonal increase in background CH_4 concentrations (Nikitin et al., 2024a; Nikitin et al., 2024b), a decrease in water temperature, and changes in the balance between methane production and oxidation. On the other hand, technical limitations must be considered: unlike the closed-path LI-7200RS gas analyzer used for measuring CO_2 , methane was measured by the open-path LI-7700 gas analyzer, and its readings during the cold season should be viewed with some caution. Additionally, the influence of optical contamination cannot be ruled out (despite the presence of an internal cleaning system for the lower mirror) – in October and November, the instrument's signal strength was low, requiring software amplification, which could have affected measurement accuracy. To clarify the nature and mechanisms of these processes, further studies are needed, including direct parallel measurements of methane concentrations in both the water and atmosphere, as well as assessing the activity of methanotrophic and methanogenic microbial communities.

During the winter period, the formation of ice cover significantly limits gas exchange, which led to the stabilization of greenhouse gas fluxes around zero values in December. The obtained results highlight the complex nature of the seasonal dynamics of GHG fluxes in the reservoir, driven by the combination of biological, physicochemical, and meteorological factors, including temperature, wind impact, and ice formation, all of which jointly determine the behavior of CH_4 and CO_2 at the water–atmosphere interface.

4. Conclusions

The initial results of the experimental assessment of greenhouse gas fluxes at the Kuibyshev Reservoir, carried out using the eddy covariance method, revealed characteristic flux amplitudes as well as patterns of their diurnal and seasonal dynamics. The summer–autumn period is characterized by pronounced methane emissions, while carbon dioxide shows daytime uptake during the warm months (August–September). The observed seasonal dynamics are driven by a combination of biological, physicochemical, and meteorological factors. The obtained data confirm the trends previously described for other temperate water bodies but also provide refinements through continuous, high-frequency EC measurements. The use of the EC method allows for the detection of short-term peak emissions and reverse fluxes that may be missed by chamber-based or calculation-based approaches. This is crucial for accurately assessing the contribution of reservoirs to regional and global carbon budgets. Without the use of the EC method, the magnitude of methane emissions – especially during periods of high turbulence or shifts in concentration gradients – would likely be significantly underestimated. Further expansion of the stationary EC monitoring network across different types of inland water bodies and climate zones could greatly enhance the accuracy of global CH_4 and CO_2 flux estimates from continental aquatic surfaces.

Acknowledgements

The work was funded by the subsidy allocated to Kazan Federal University for the state assignment in the sphere of scientific activities (No. FZSM-2024-0004).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Baldocchi A.K., Reed D.E., Loken L.C. et al. 2020. Comparing spatial and temporal variation of lake-atmosphere carbon dioxide fluxes using multiple methods. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 125(12): e2019JG005623. DOI: [10.1029/2019jg005623](https://doi.org/10.1029/2019jg005623)
- Barros N., Cole J.J., Tranvik L.J. et al. 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. *Nature Geoscience* 4(9): 593–596. DOI: [10.1038/ngeo1211](https://doi.org/10.1038/ngeo1211)
- Bastviken D., Tranvik L.J., Downing J.A. et al. 2011. Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. *Science* 331(6013): 50. DOI: [10.1126/science.1196808](https://doi.org/10.1126/science.1196808)
- Bauduin T., Gypens N., Borges A.V. 2025. Sub-daily variability of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide emissions from two urban ponds in Brussels (Belgium). *Journal of Environmental Management* 373: 123627. DOI: [10.1016/j.jenvman.2024.123627](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123627)
- Beaulieu J.J., Waldo S., Balz D.A. et al. 2020. Methane and carbon dioxide emissions from reservoirs: controls and upscaling. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 125(12): e2019JG005474. DOI: [10.1029/2019jg005474](https://doi.org/10.1029/2019jg005474)
- Berberich M.E., Beaulieu J.J., Hamilton T.L. et al. 2019. Spatial variability of sediment methane production and methanogen communities within a eutrophic reservoir: importance of organic matter source and quantity. *Limnology and Oceanography* 65(6): 1336–1358. DOI: [10.1002/lno.11392](https://doi.org/10.1002/lno.11392)
- Berg P., Pace M.L., Buelo C.D. 2020. Air–water gas exchange in lakes and reservoirs measured from a moving platform by underwater eddy covariance. *Limnology and Oceanography: Methods* 18(8): 424–436. DOI: [10.1002/lom3.10373](https://doi.org/10.1002/lom3.10373)
- Burba G. 2022. Eddy covariance method for scientific, regulatory, and commercial applications. Lincoln, Nebraska: LI-COR Biosciences. ISBN: 978-0-578-97714-0.
- Burba G.G., Kurbatova Yu.A., Kuricheva O.A. et al. 2016. Metod turbulentnykh pul'satsiy. Eddy covariance method. Short practical guide. Moscow: LI-COR Biosciences, Russian Academy of Sciences. (in Russian)
- Deemer B.R., Harrison J.A., Li S. et al. 2016. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis. *BioScience* 66(11): 949–964. DOI: [10.1093/biosci/biw117](https://doi.org/10.1093/biosci/biw117)
- Deemer B.R., Harrison J.A., Li S. et al. 2020. Data from: Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis [Dataset]. Dryad. DOI: [10.5061/dryad.d2kv0](https://doi.org/10.5061/dryad.d2kv0)
- Erkkilä K.M., Ojala A., Bastviken D. et al. 2018. Methane and carbon dioxide fluxes over a lake: comparison between eddy covariance, floating chambers and boundary layer method. *Biogeosciences* 15(2): 429–445. DOI: [10.5194/bg-15-429-2018](https://doi.org/10.5194/bg-15-429-2018)
- Erland B.M., Thorpe A.K., Gamon J.A. 2022. Recent advances toward transparent methane emissions monitoring: a review. *Environmental Science & Technology* 56(23): 16567–16581. DOI: [10.1021/acs.est.2c02136](https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02136)
- Eugster W., Kling G., Jonas T. et al. 2003. CO₂ exchange between air and water in an Arctic Alaskan and midlatitude Swiss lake: Importance of convective mixing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108(D12): 1–20. DOI: [10.1029/2002jd002653](https://doi.org/10.1029/2002jd002653)
- Flerlage H., Velders G.J.M., de Boer J. 2021. A review of bottom-up and top-down emission estimates of hydrofluorocarbons (HFCs) in different parts of the world. *Chemosphere* 283: 131208. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2021.131208](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131208)
- Gafurov A., Usmanov B., Khomyakov P. 2024. Modelling of Kuibyshev reservoir shallow water depths by bathymetric surveys and multispectral UAV imagery data: a case study. *BIO Web of Conferences* 126: 01047. DOI: [10.1051/bioconf/202412601047](https://doi.org/10.1051/bioconf/202412601047)
- Goldenfum J.A. 2010. GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs. London: International Hydropower Association (IHA). ISBN 978-0-9566228-0-8.
- Golub M., Koupaei-Abyazani N., Vesala T. et al. 2023. Diel, seasonal, and inter-annual variation in carbon dioxide effluxes from lakes and reservoirs. *Environmental Research Letters* 18(3): 034046. DOI: [10.1088/1748-9326/acb834](https://doi.org/10.1088/1748-9326/acb834)
- Grechushnikova M.G., Repina I.A., Frolova N.L. et al. 2023. Methane concentration and fluxes in Volga River reservoirs. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series]* 87(6): 899–913. DOI: [10.31857/S2587556623060080](https://doi.org/10.31857/S2587556623060080) (in Russian)
- Gruca-Rokosz R., Cieřla M. 2021. Sediment methane production within eutrophic reservoirs: the importance of sedimenting organic matter. *Science of The Total Environment* 799: 149219. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.149219](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149219)
- Hamdan L.J., Wickland K.P. 2016. Methane emissions from oceans, coasts, and freshwater habitats: New perspectives and feedbacks on climate. *Limnology and Oceanography* 61(S1): S3–S12. DOI: [10.1002/lno.10449](https://doi.org/10.1002/lno.10449)
- Harrison J.A., Prairie Y.T., Mercier-Blais S. et al. 2021. Year-2020 global distribution and pathways of reservoir methane and carbon dioxide emissions according to the greenhouse gas from reservoirs (G-res) model. *Global Biogeochemical Cycles* 35(6): e2020GB006888. DOI: [10.1029/2020gb006888](https://doi.org/10.1029/2020gb006888)
- Hounshell A.G., D'Acunha B.M., Breef-Pilz A. et al. 2023. Eddy covariance data reveal that a small freshwater reservoir emits a substantial amount of carbon dioxide and methane. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 128(3): e2022JG007091. DOI: [10.1029/2022jg007091](https://doi.org/10.1029/2022jg007091)
- Huotari J., Ojala A., Peltomaa E. et al. 2011. Long-term direct CO₂ flux measurements over a boreal lake: five years of eddy covariance data. *Geophysical Research Letters* 38(18): L18401. DOI: [10.1029/2011gl048753](https://doi.org/10.1029/2011gl048753)
- Iakunin M., Stepanenko V., Salgado R. et al. 2020. Numerical study of the seasonal thermal and gas regimes of the largest artificial reservoir in western Europe using the LAKE 2.0 model. *Geoscientific Model Development* 13(8): 3475–3488. DOI: [10.5194/gmd-13-3475-2020](https://doi.org/10.5194/gmd-13-3475-2020)
- IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K. et al. (Eds). Japan: IGES. ISBN 4-88788-032-4. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> (accessed: 22.07.2025)
- Isidorova A., Grasset C., Mendonça R. et al. 2019. Methane formation in tropical reservoirs predicted from sediment age and nitrogen. *Scientific Reports* 9(1): 1–9. DOI: [10.1038/s41598-019-47346-7](https://doi.org/10.1038/s41598-019-47346-7)
- Jensen S.A., Webb J.R., Simpson G.L. et al. 2022. Seasonal variability of CO₂, CH₄, and N₂O content and fluxes in small agricultural reservoirs of the northern Great Plains. *Frontiers in Environmental Science* 10: 895531. DOI: [10.3389/fenvs.2022.895531](https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.895531)
- Johnson M.S., Matthews E., Bastviken D. et al. 2021. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 126(8): e2021JG006305. DOI: [10.1029/2021jg006305](https://doi.org/10.1029/2021jg006305)
- Latypova V.Z., Stepanova N.Yu., Kondratyeva T.A. et al. 2023. Monitoring of Kuibyshev reservoir surface water in the area of the "Carbon - Povolgye" polygon water section. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii [Russian Journal of Applied Ecology]* 4(36): 39–49. DOI: [10.24852/2411-7374.2023.4.39.49](https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.39.49) (in Russian)
- Lehner B., Liermann C.R., Revenga C. et al. 2011. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(9): 494–502. DOI: [10.1890/100125](https://doi.org/10.1890/100125)

- Liu B., Li Z., Wang J. et al. 2023. Thin boundary layer model underestimates greenhouse gas diffusion from inland waterways. *Environmental Research* 233: 116472. DOI: [10.1016/j.envres.2023.116472](https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116472)
- Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M. et al. 2024. Mechanistic modeling of the variability of methane emissions from an artificial reservoir. *Water* 16(1): 76. DOI: [10.3390/w16010076](https://doi.org/10.3390/w16010076)
- Lomov V.A. 2021. Methods for instrumental assessment of methane emission in reservoirs. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 8 34(1): 012032. DOI: [10.1088/1755-1315/834/1/012032](https://doi.org/10.1088/1755-1315/834/1/012032)
- Lorke A., Bodmer P., Noss C. et al. 2015. Technical note: drifting versus anchored flux chambers for measuring greenhouse gas emissions from running waters. *Biogeosciences* 12(23): 7013–7024. DOI: [10.5194/bg-12-7013-2015](https://doi.org/10.5194/bg-12-7013-2015)
- Long M.H. 2021. Aquatic biogeochemical eddy covariance fluxes in the presence of waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 126(2): e2020JC016637. DOI: [10.1029/2020JC016637](https://doi.org/10.1029/2020JC016637)
- Ma S., Worden J.R., Bloom A.A. et al. 2021. Satellite constraints on the latitudinal distribution and temperature sensitivity of wetland methane emissions. *AGU Advances* 2(3): e2021AV000408. DOI: [10.1029/2021av000408](https://doi.org/10.1029/2021av000408)
- Martínez-García A., Peralta-Maraver I., Rodríguez-Velasco E. et al. 2024. Particulate organic carbon sedimentation triggers lagged methane emissions in a eutrophic reservoir. *Limnology and Oceanography Letters* 9(3): 247–257. DOI: [10.1002/lol2.10379](https://doi.org/10.1002/lol2.10379)
- Moras S., Zellmer U.R., Hiltunen E. et al. 2024. Predicting methane formation rates of freshwater sediments in different biogeographic regions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 129(1): e2023JG007463. DOI: [10.1029/2023jg007463](https://doi.org/10.1029/2023jg007463)
- Morin T.H., Bohrer G., Naor-Azrieli L. et al. 2014. The seasonal and diurnal dynamics of methane flux at a created urban wetland. *Ecological Engineering* 72: 74–83. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2014.02.002](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.02.002)
- Naslund L.C., Mehring A.S., Rosemond A.D. et al. 2024. Toward more accurate estimates of carbon emissions from small reservoirs. *Limnology and Oceanography* 69(6): 1350–1364. DOI: [10.1002/lno.12577](https://doi.org/10.1002/lno.12577)
- Nicholls D., Barnes F., Acrea F. et al. 2015. Top-down and bottom-up approaches to greenhouse gas inventory methods – a comparison between national- and forest-scale reporting methods. *Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-906*. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Nikitin O.V., Latypova V.Z., Stepanova N.Yu. et al. 2022. Water site of the Volga Carbon Polygon in the Republic of Tatarstan. In: *Biodiagnostics of natural and natural-technogenic systems*. Kirov: Vyatka State University, pp. 28–33. (in Russian)
- Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Kondratyeva T.A. et al. 2024. Spatiotemporal dynamics of phytoplankton blooms in Kuibyshev Reservoir based on satellite remote sensing data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the earth from space] 21(6): 284–293. DOI: [10.21046/2070-7401-2024-21-6-284-293](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-6-284-293) (in Russian)
- Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Kuzmin R.S. et al. 2024. Estimation of atmospheric methane levels over the Republic of Tatarstan (Russia) territory in 2019–2023 using satellite remote sensing data: effects of anthropogenic and climate drivers. *E3S Web of Conferences* 498: 02008. DOI: [10.1051/e3sconf/202449802008](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449802008)
- Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Gubeeva S.S. et al. 2024. Assessment of methane levels throughout a temperate reservoir area using remote sensing data. *E3S Web of Conferences* 555: 01009. DOI: [10.1051/e3sconf/202455501009](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455501009)
- Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Kuzmin R.S. et al. 2025. Assessment of greenhouse gas emissions from the Kuibyshev reservoir using the G-res model. In: *Lakes of Eurasia: problems and solutions*. Kazan: Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, pp. 459–464. ISBN: 978-5-9690-1336-0 (in Russian)
- Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Shevchuk K.A. et al. 2025. Assessment of methane emissions in shallow waters of Kuibyshev reservoir using floating chamber method. In: *Actual problems of ecology and nature management*. Moscow: RUDN University, pp. 327–331. (in Russian)
- Pilla R.M., Faehndrich C.S., Fortner A.M. et al. 2024. Shifts in carbon emissions versus sequestration from hydropower reservoirs in the southeastern United States. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 129(7): e2023JG007580. DOI: [10.1029/2023jg007580](https://doi.org/10.1029/2023jg007580)
- Podgrajsek E., Sahlée E., Bastviken D. et al. 2014. Comparison of floating chamber and eddy covariance measurements of lake greenhouse gas fluxes. *Biogeosciences* 11(15): 4225–4233. DOI: [10.5194/bg-11-4225-2014](https://doi.org/10.5194/bg-11-4225-2014)
- Podgrajsek E., Sahlée E., Rutgersson A. 2014. Diurnal cycle of lake methane flux. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 119(3): 236–248. DOI: [10.1002/2013jg002327](https://doi.org/10.1002/2013jg002327)
- Podgrajsek E., Sahlée E., Rutgersson A. 2015. Diel cycle of lake-air CO₂ flux from a shallow lake and the impact of waterside convection on the transfer velocity. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 120(1): 29–38. DOI: [10.1002/2014jg002781](https://doi.org/10.1002/2014jg002781)
- Rosentreter J.A., Borges A.V., Deemer B.R. et al. 2021. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nature Geoscience* 14(4): 225–230. DOI: [10.1038/s41561-021-00715-2](https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2)
- Scholz K., Ejarque E., Hammerle A. et al. 2021. Atmospheric CO₂ exchange of a small mountain lake: limitations of eddy covariance and boundary layer modeling methods in complex terrain. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 126(7): e2021JG006286. DOI: [10.1029/2021jg006286](https://doi.org/10.1029/2021jg006286)
- Schubert C.J., Diem T., Eugster W. 2012. Methane emissions from a small wind shielded lake determined by eddy covariance, flux chambers, anchored funnels, and boundary model calculations: a comparison. *Environmental Science & Technology* 46(8): 4515–4522. DOI: [10.1021/es203465x](https://doi.org/10.1021/es203465x)
- Semerjian H.G., Wong T.M., Whetstone J.R. 2024. NIST greenhouse gas measurements program: a decade of critical accomplishments. *NIST Technical Note (TN) 2291*. DOI: [10.6028/nist.tn.2291](https://doi.org/10.6028/nist.tn.2291)
- Shahady T. 2024. Hydropower reservoirs as arbiters of climate change. In: *Inland Waters – Ecology, Limnology, and Environmental Protection*. IntechOpen. DOI: [10.5772/intechopen.1005111](https://doi.org/10.5772/intechopen.1005111)
- Sogachev A.F., Repina I.A., Kozhevnikova M.V. et al. 2024. Assessment of the impact area on water-atmosphere gas exchange in the coastal zone: the case of the water site of the Volga Carbon Polygon. In: *Turbulence, dynamics of the atmosphere and climate*. Moscow: Fizmatkniga, pp. 197. (in Russian)
- St. Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin É. et al. 2000. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate. *BioScience* 50(9): 766. DOI: [10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0766:rsasog\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0766:rsasog]2.0.co;2)
- Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A. et al. 2016. LAKE 2.0: A model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. *Geoscientific Model Development* 9(5): 1977–2006. DOI: [10.5194/gmd-9-1977-2016](https://doi.org/10.5194/gmd-9-1977-2016)
- Stepanenko V.M., Machul'skaya E.E., Glagolev M.V. et al. 2011. Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone. *Izvestiya - Atmospheric and Oceanic Physics* 47(2): 252–264. DOI: [10.1134/s0001433811020113](https://doi.org/10.1134/s0001433811020113)

Thirkill R.H., Ramón C.L., Oldroyd H.J. et al. 2024. Navigating greenhouse gas emission unknowns: a hydro-acoustic examination of mediterranean climate reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 129(12): e2024JG008080. DOI: [10.1029/2024jg008080](https://doi.org/10.1029/2024jg008080)

Thottathil S.D., Reis P.C.J., Prairie Y.T. 2019. Methane oxidation kinetics in northern freshwater lakes. *Biogeochemistry* 143: 105–116. DOI: [10.1007/s10533-019-00552-x](https://doi.org/10.1007/s10533-019-00552-x)

Varis O., Kumm M., Härkönen S. et al. 2012. Greenhouse gas emissions from reservoirs. In: Tortajada C., Altinbilek D., Biswas A. (Eds), *Impacts of Large Dams: A Global Assessment*. Berlin: Springer, pp. 69–94. ISBN: 978-3-642-23570-2. DOI: [10.1007/978-3-642-23571-9_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23571-9_4)

Vesala T., Eugster W., Ojala A. 2012. Eddy covariance measurements over lakes. In: Aubinet M., Vesala T., Papale D. (Eds), *Eddy Covariance*. Dordrecht: Springer, pp. 365–376. ISBN: 978-94-007-2350-4. DOI: [10.1007/978-94-007-2351-1_15](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1_15)

Waldo S., Beaulieu J.J., Barnett W. et al. 2021. Temporal trends in methane emissions from a small eutrophic reservoir: the key role of a spring burst. *Biogeosciences* 18: 5291–5311. DOI: [10.5194/bg-18-5291-2021](https://doi.org/10.5194/bg-18-5291-2021)

Yang P., Huang J., Yang H. et al. 2021. Diffusive CH₄ fluxes from aquaculture ponds using floating chambers and thin boundary layer equations. *Atmospheric Environment* 253: 118384. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2021.118384](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118384)

Zhang S., Ma J., Zhang X. et al. 2023. Atmospheric remote sensing for anthropogenic methane emissions: Applications and research opportunities. *Science of The Total Environment* 893: 164701. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.164701](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164701)

Потоки парниковых газов (CH₄, CO₂) с поверхности Куйбышевского водохранилища: исследование методом турбулентных пульсаций



Никитин О.В.^{1*}, Степанова Н.Ю.², Аухадеев Т.Р.², Латыпова В.З.²

¹ ООО «Экоаудит», ул. Сеченова, 17, Казань, 420061, Россия

² Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, 420008, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлены результаты оценки потоков парниковых газов (метана и углекислого газа) с поверхности Куйбышевского водохранилища (Россия) методом турбулентных пульсаций (eddy covariance) с использованием газоанализаторов LI-7700 (CH₄) и LI-7200RS (CO₂/H₂O). Измерения проводились в августе–декабре 2024 года на мелководном участке (2–4 м) водохранилища в пределах водного кластера карбонового полигона «Карбон – Поволжье» (Республика Татарстан, Россия). Результаты показали, что водоём является источником метана и углекислого газа, с максимальной эмиссией в августе–сентябре ($52,84 \pm 22,49$ и $47,53 \pm 27,06$ мг CH₄ м⁻²·сут⁻¹; $2,32 \pm 1,70$ и $2,54 \pm 1,75$ г CO₂ м⁻²·сут⁻¹ соответственно). В то же время для углекислого газа в августе–сентябре фиксировался и выраженный дневной сток, обусловленный фотосинтетической активностью фитопланктона. Осенью, наряду с эмиссией, периодически регистрировался обратный поток метана из атмосферы в водную толщу. Зимой газообмен минимизировался из-за ледового покрова. Сезонная изменчивость потоков определяется сочетанием биологических процессов (продукция и окисление метана, фотосинтез), физических факторов (температура воды, концентрационные градиенты, турбулентное перемешивание) и метеорологических условий (ветровое воздействие, установление ледового покрова). Метод турбулентных пульсаций позволяет получать непрерывные данные с высокой временной разрешающей способностью и учитывать пространственную гетерогенность водной поверхности. Полученные данные важны для уточнения вклада водохранилищ в региональный углеродный баланс и глобальный углеродный цикл, а также демонстрируют преимущества применения метода турбулентных пульсаций в подобных исследованиях.

Ключевые слова: парниковые газы, метан, углекислый газ, метод турбулентных пульсаций, Куйбышевское водохранилище, карбоновый полигон «Карбон – Поволжье»

Для цитирования: Никитин О.В., Степанова Н.Ю., Аухадеев Т.Р., Латыпова В.З. Потоки парниковых газов (CH₄, CO₂) с поверхности Куйбышевского водохранилища: исследование методом турбулентных пульсаций // Limnology and Freshwater Biology. 2025. - № 4. - С. 995-1012. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-4-995](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-4-995)

1. Введение

Водохранилища занимают важное место в структуре современных ландшафтов, выполняя широкий спектр хозяйственных функций, включая выработку гидроэнергии, управление водными ресурсами, контроль наводнений, обеспечение водоснабжения, рекреацию и судоходство (Lehner et al., 2011; Deemer et al., 2016). Помимо этого, они играют значительную роль в поддержании экологических функций, таких как регулирование гидрологических процессов, поддержание биоразнообразия и участие в круговороте веществ. В контексте

углеродного цикла водохранилища являются как накопителями, так и источниками углерода, влияя на локальные и глобальные биогеохимические процессы. Они участвуют в переработке как аллохтонного органического вещества, поступающего с водосборного бассейна, так и автохтонного, образующегося в водоёме в процессе жизнедеятельности гидробионтов и разложения детрита. Эти вещества подвергаются физико-химической и биологической трансформации, в результате чего образуются углекислый газ (CO₂) и метан (CH₄), что существенно влияет на глобальный бюджет парниковых газов (St. Louis et al., 2000; Barros et al., 2011; Bastviken et al.,

*Автор для переписки.

Адрес e-mail: olnova@mail.ru (О.В. Никитин)

Поступила: 02 августа 2025; **Принята:** 19 августа 2025;

Опубликована online: 31 августа 2025

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



2011; Varis et al., 2012; Deemer et al., 2016; Hamdan and Wickland, 2016; Beaulieu et al., 2020; Johnson et al., 2021; Martínez-García et al., 2024; Nikitin et al., 2024b). Последние исследования показывают, что метан, образующийся в водных системах, может превышать по объёму прямые антропогенные выбросы, включая выбросы от сельского хозяйства и использования ископаемого топлива. В совокупности водные экосистемы, включая водно-болотные угодья, могут обеспечивать не менее половины глобального бюджета выбросов CH_4 (Rosentreter et al., 2021). Оценка эмиссии и стока парниковых газов (ПГ) с поверхности водохранилищ является ключевым элементом для понимания их вклада в глобальный углеродный цикл, а также для разработки эффективных мер по смягчению последствий климатических изменений (Goldenfum, 2010; Shahady, 2024).

Водоёмы, включая водохранилища, представляют собой сложные экосистемы, где эмиссия ПГ определяется множеством факторов, включая гидрологические, биогеохимические и климатические условия. Разнообразие процессов, происходящих в этих экосистемах, требует применения комплексных методов оценки, способных учитывать как глобальные тенденции, так и локальные особенности (Harrison et al., 2021). В современной практике для этого выделяют три основных подхода: «сверху вниз» (нисходящее моделирование – top-down), «снизу вверх» (восходящее моделирование – bottom-up) и гибридный, объединяющий черты обоих направлений (IPCC, 2006; Nicholls et al., 2015; Flerlage et al., 2021; Ma et al., 2021; Erland et al., 2022; Zhang et al., 2023; Semerjian et al., 2024).

Подход «снизу вверх» основывается на локальных измерениях и детальном изучении процессов, происходящих на уровне отдельных водоёмов. Этот метод предполагает использование полевых данных и параметризацию механизмов, таких как поступление и разложение органического вещества, метаногенез и метанотрофия, дыхание и фотосинтез и других, для оценки эмиссии и стока парниковых газов (Berberich et al., 2019; Isidorova et al., 2019; Thottathil et al., 2019; Gruca-Rokosz and Cieśla, 2021; Moras et al., 2024). Методы измерения потоков CH_4 и CO_2 в рамках данного подхода включают использование стационарных или дрейфующих плавающих камер (floating chamber, FC), инвертированных воронок и эхолотов, модели тонкого пограничного слоя (thin boundary layer, TBL) или турбулентных пульсаций (вихревой ковариации, МТП – eddy covariance, EC), позволяющих получить точные данные о газообмене на границе вода-атмосфера (Schubert et al., 2012; Podgrajsek et al., 2014a; Lorke et al., 2015; Erkkilä et al., 2018; Lomov, 2021; Yang et al., 2021; Hounshell et al., 2023; Liu et al., 2023; Thirkill et al., 2024). Кроме того, локальные модели, основанные на биогеохимических процессах, используют данные об интенсивности поступления органического вещества в водоём, температуре, уровне pH, содержании кислорода и других характеристиках, которые определяют интенсивность потоков ПГ (Stepanenko et al.,

2011; 2016; Iakunin et al., 2020; Lomov et al., 2024).

Основным преимуществом подхода является высокая точность, достигаемая благодаря учету специфических условий конкретного водоёма, таких как локальная гидродинамика, структура донных отложений или микробиологическая активность. Это делает его особенно эффективным для оценки эмиссий на уровне отдельных водных объектов или ограниченных территорий, где требуется высокая степень детализации. Кроме того, метод позволяет учитывать особенности функционирования экосистемы и гибко адаптироваться к специфике каждого водоёма (Waldo et al., 2021; Naslund et al., 2024). Однако у подхода также есть свои ограничения. Он требует значительных временных и финансовых ресурсов для проведения полевых исследований, а также сложного и трудоёмкого анализа данных. Применение метода на крупных акваториях усложняется из-за необходимости масштабирования результатов, а сезонная и межгодовая изменчивость процессов может привести к дополнительным трудностям в интерпретации результатов. Несмотря на это, подход «снизу вверх» остаётся незаменимым инструментом для детализированных исследований потоков парниковых газов и разработки локальных моделей, что делает его ключевым элементом комплексной оценки эмиссий и стока ПГ с водоёмов.

Метод турбулентных пульсаций является современным и высокоточным инструментом для количественной оценки обмена газов между поверхностью водоёмов и атмосферой (Berg et al., 2020). Принцип метода основан на измерении мгновенных флуктуаций вертикальной составляющей скорости ветра и концентрации исследуемого газа (Бурба и др., 2016). Анализ совместных временных рядов этих параметров позволяет определить поток газа, обусловленный турбулентным переносом, что делает метод одним из наиболее эффективных и информативных инструментов для изучения эмиссии парниковых газов с поверхности водных объектов (Waldo et al., 2021; Long, 2021).

Основное преимущество метода турбулентных пульсаций заключается в возможности непрерывного и автоматизированного мониторинга потоков газов на масштабах от нескольких минут до сезонов, что обеспечивает получение данных с высокой временной разрешающей способностью. Кроме того, метод позволяет оценивать интегральные потоки на крупных пространственных масштабах, исключая необходимость локальных измерений (Morin et al., 2014). Это особенно важно для оценки потоков на гетерогенных поверхностях, где локальные методы, такие как плавучие камеры, могут давать ограниченное представление. Однако применение метода турбулентных пульсаций сопряжено с рядом технических и методологических сложностей. На водных объектах точность измерений может снижаться из-за низкой скорости ветра, турбулентных эффектов от окружающей растительности, а также влияния температурной стратификации и микрометеорологических условий. Для

успешного использования метода необходима тщательная калибровка оборудования, контроль условий измерений и применение методов фильтрации данных для исключения шумов и артефактов (Vesala et al., 2012; Бурба и др., 2016; Burba, 2022).

Несмотря на ограничения, метод турбулентных пульсаций широко используется в экологических и климатических исследованиях благодаря его универсальности, высокой точности и возможности получения данных в реальном времени. Включение результатов, полученных с использованием ЕС, в региональные и глобальные модели эмиссии парниковых газов способствует более точной оценке углеродного цикла и роли водоёмов в климатических процессах (Huotari et al., 2011; Baldocchi et al., 2020; Scholz et al., 2021; Golub et al., 2023).

Цель данной работы – количественная оценка потоков метана и углекислого газа с поверхности Куйбышевского водохранилища методом турбулентных пульсаций.

2. Материалы и методы

Куйбышевское водохранилище (КВ) расположено в Среднем Поволжье и Нижнем Прикамье Европейской части России. Оно было создано в 1955–1957 гг. при строительстве плотины Жигулёвской ГЭС (ранее Куйбышевская ГЭС) на р. Волге вблизи Жигулёвска и Тольятти в Самарской области. Куйбышевское водохранилище является крупнейшим в Волжско-Камском каскаде и одним из крупнейших в мире. Водохранилище занимает площадь 5900 км² и имеет общую ёмкость 57,3 км³. Акватория КВ имеет сложную конфигурацию: на всем протяжении обширные озерные участки (15–20 км) чередуются с узкими проливами, ширина которых не превышает 3–5 км (Никитин и др., 2024).

Оценка потоков парниковых газов проводилась в акватории водного участка карбонового полигона «Карбон – Поволжье» (Никитин и др., 2022; Латыпова и др., 2023) в период с 7 августа по 16 декабря 2024 года. Участок представляет собой открытое мелководье КВ, с глубинами 2–4 м (Gafurov et al., 2024). С севера участок ограничен береговой линией, с юга – полукруглым вытянутым островом, представляющим собой остаток грядовых возвышенностей затопленной поймы реки Волги.

Для проведения измерений использовалось следующее основное оборудование: инфракрасные газоанализаторы открытого типа LI-7700 (CH₄) и закрытого типа LI-7200RS (CO₂/H₂O) (LI-COR, США), а также ультразвуковой трёхосевой (3D) анемометр uSonic-3 Cage MP (Metek, Германия). Оборудование размещалось на стационарно заякоренном понтоне (55°16'09.9" с.ш., 49°16'48.6" в.д.) на высоте около 2 м над поверхностью воды (Рис. 1). Использование плавучей платформы, компенсирующей колебания уровня воды, обеспечивало постоянную высоту ЕС-системы над поверхностью в течение всего периода наблюдений. Высота установки датчиков отражает баланс между сохранением адекватных частотных характеристик для регистрации турбулентных вихрей и зоной охвата измерений – футпринтом (Burba, 2022), представляющим интересующую область акватории. Для измерительных приборов данной площадки потенциальная зона влияния представлена преимущественно водной поверхностью (от 85 до 100 % в зависимости от направления и скорости ветра) (Согачев и др., 2024). Для измерения суммарной радиации (R_g, Вт·м⁻²), использовался четырехкомпонентный радиометр-балансометр CNR4 (Kipp & Zonen, Нидерланды) с модулем обогрева и вентиляции. Для измерения температуры и влажности воздуха использовался комбинированный датчик HMP155 (Vaisala, Финляндия).

Измерения выполнялись с частотой 10 Гц и фиксировались регистратором данных (интерфейсный модуль LI-7550, модуль обработки данных SMARTFlux 2 (LI-COR, США)). Исходные данные с частотой 10 Гц обрабатывались в 30-минутные потоки с помощью программного обеспечения EddyPro 7 (LI-COR, США). Постобработка данных, фильтрация и заполнение пропусков выполнялись с использованием специализированного пакета REdyProc в программной среде R. Дальнейшая статистическая обработка проводилась в программе Statistica 10 (StatSoft, США). Из общей выборки исходных 30-минутных данных были отфильтрованы значения (выбросы), выходящие за пределы утроенного стандартного отклонения. Оставшиеся данные были усреднены посуточно с разделением на дневные (R_g > 0 Вт·м⁻²) и ночные (R_g ≤ 0 Вт·м⁻²) периоды, а также выполнено помесечное осреднение.

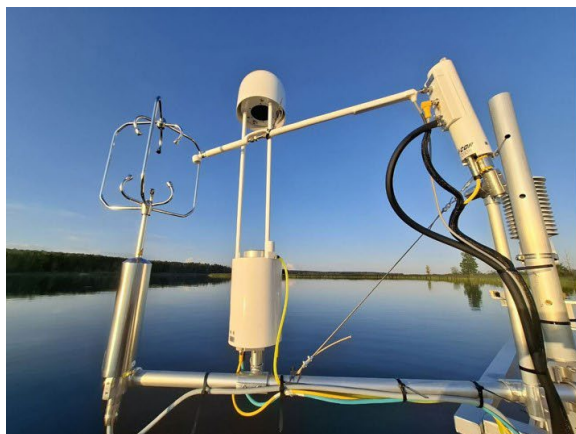


Рис.1. Плавучая платформа с оборудованием для оценки потоков парниковых газов методом турбулентных пульсаций в акватории Куйбышевского водохранилища (<https://kpfu.ru/ecology/karbon-povolzhe>, фото: В.Е. Прохоров).

Результаты представлены в виде среднего арифметического значения $\pm$ стандартное отклонение (Среднее $\pm$ Ст.откл.). На рисунках дополнительно отображена медиана для визуализации распределения данных. При интерпретации направленности потоков использовали следующее соглашение: положительные значения соответствуют эмиссии ПГ с водной поверхности в атмосферу, отрицательные – стоку из атмосферы.

3. Результаты и обсуждение

За период наблюдений был зафиксирован характерный для региона ход температуры воздуха (Рис. 2) с диапазоном среднесуточных значений от $18,8 \pm 2,7$ °C в августе до $-3,5 \pm 3,5$ °C в декабре. Суммарная радиация (R_g) также демонстрировала выраженную сезонную динамику (Рис. 3): максимальные значения достигали $861 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ в августе и всего $183 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ в декабре, что отражает изменения в длительности светового дня и облачности.

Результаты выполненных наблюдений с использованием ЕС показывают, что рассматриваемая акватория Куйбышевского водохранилища в целом является источником ПГ (Рис. 4–6). Однако характер эмиссии углекислого газа и метана имеет свои особенности. В случае метана водная поверхность, как правило, остаётся постоянным источником газа, независимо от времени суток. Из литературных данных известно, что максимальная интенсивность потока CH_4 может наблюдаться как в ночное время (Podgrajsek et al., 2014b), так и в дневное (Morin et al., 2014). В некоторых случаях внутрисуточные различия оказываются слабо выраженными или переменчивыми: в одно время преобладают ночные значения, в другое – дневные, причём закономерности этих изменений остаются неочевидными (Waldo et al., 2021).

В рамках наших наблюдений (Рис. 4), наибольшая эмиссия CH_4 была зафиксирована в дневное время в августе – $0,71 \pm 0,45 \text{ мкг CH}_4 \text{ м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ (по сравнению с $0,44 \pm 0,35 \text{ мкг CH}_4 \text{ м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ночью), тогда как в сентябре чуть более высокая эмиссия наблюдалась ночью – $0,59 \pm 0,53 \text{ мкг CH}_4 \text{ м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ (против $0,56 \pm 0,57 \text{ мкг CH}_4 \text{ м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ днём). В остальные месяцы эмиссия метана в дневное и ночное время оставалась на схожем уровне, с усреднёнными значениями, близкими к нулю.

Для углекислого газа наблюдается иной процесс (Podgrajsek et al., 2015; Bauduin et al., 2025): в дневное время, благодаря фотосинтетической активности фитопланктона, водоём может выступать в роли стока, поглощая CO_2 . Этот эффект наиболее заметен в летние месяцы, когда интенсивность фотосинтеза достигает своего пика (Scholz et al., 2021; Golub et al., 2023). Аналогичные процессы, при которых продуктивность водорослей фактически приводит к секвестрации углекислого газа, описаны для различных водохранилищ мира (Pilla et al., 2024). Однако стоит подчеркнуть, что подобная суточная динамика не определяется одними лишь биологическими процессами, но также зависит от микрометеорологических и гидродинамических условий водоёма (Eugster et al., 2003). Схожую картину можно отметить и для Куйбышевского водохранилища (Рис. 5). В августе и сентябре преобладала ночная эмиссия CO_2 , составлявшая 59,79 и 58,07 $\text{мкг CO}_2 \text{ м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ соответственно, по сравнению с дневным потоком в 2,64 и 1,91 $\text{мкг CO}_2 \text{ м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. В октябре разница уменьшилась, и значения эмиссии составили 21,14 $\text{мкг CO}_2 \text{ м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ ночью и 7,33 $\text{мкг CO}_2 \text{ м}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ днём. В оставшиеся два месяца значения находились на сопоставимом уровне как в дневное, так и в ночное время. В течение рассматриваемого периода с августа по декабрь среднемесячная эмиссия CO_2 снижалась с максимальной до практически

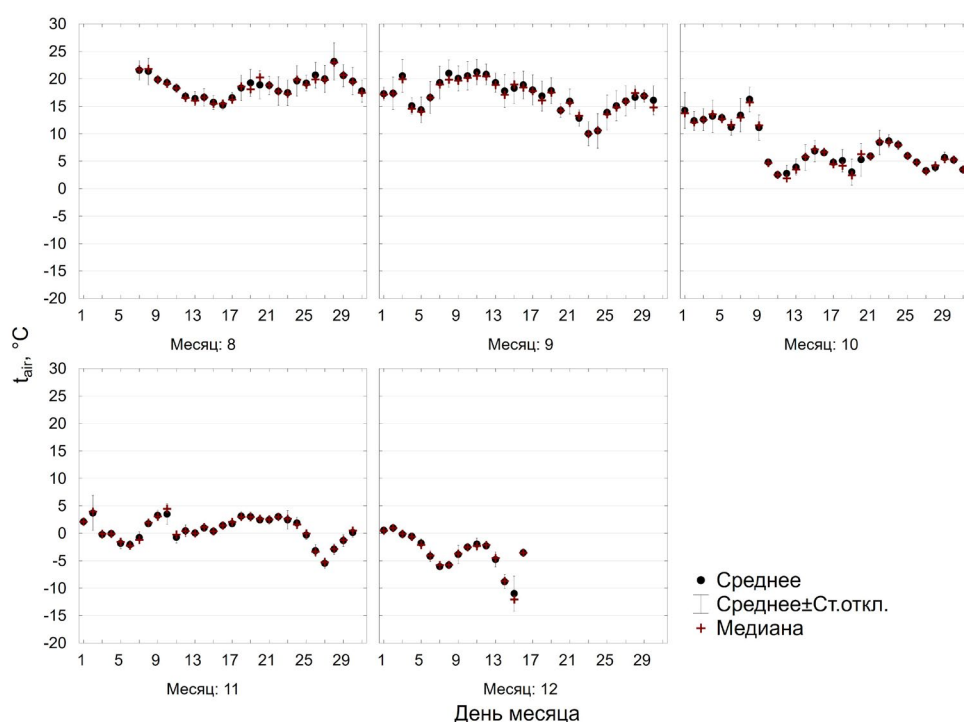


Рис.2. Динамика среднесуточной температуры приземного слоя атмосферного воздуха (t_{air} , °C) за период наблюдений.

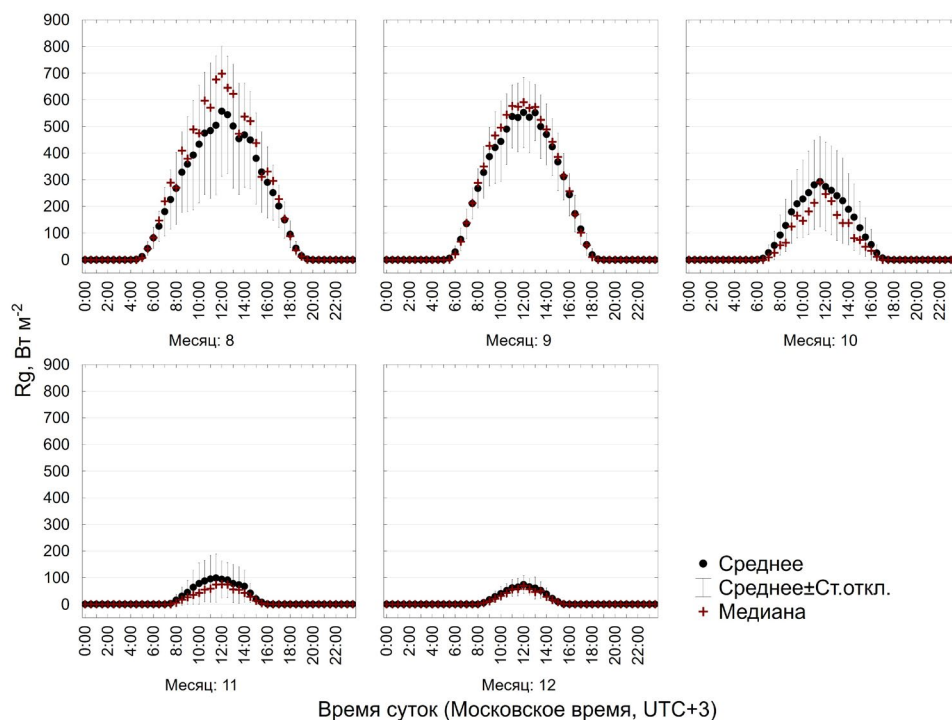


Рис.3. Суточная динамика суммарной радиации (R_g , Вт/м²) по месяцам наблюдений.

нулевой в следующем ряду значений: $2,32 \pm 1,70$, $2,54 \pm 1,75$, $1,37 \pm 0,68$, $0,52 \pm 0,42$ и $0,10 \pm 0,23$ г CO_2 м⁻²сут⁻¹ соответственно (Рис. 6). Полученные результаты согласуются с оценками эмиссии углекислого газа от Куйбышевского водохранилища по результатам моделирования – $1,34$ г CO_2 м⁻²сут⁻¹ (Никитин и др., 2025а), а также соотносятся с диапазонами значений, представленными в литературе для мезотрофных–эвтрофных водохранилищ, в соответствии с которыми эмиссия углекислого газа составляет в среднем $1,20$ – $1,41$ г CO_2 м⁻²сут⁻¹ (Deemer et al., 2020).

Сезонная динамика метана с поверхности водохранилища демонстрирует положительный поток в августе и сентябре (Рис. 6). В эти месяцы зафиксированы максимальные значения эмиссии CH_4 : средний поток составил $52,84 \pm 22,49$ мг CH_4

м⁻²сут⁻¹ в августе и $47,53 \pm 27,06$ мг CH_4 м⁻²сут⁻¹ в сентябре. Результаты в целом совпадают с оценкой потока метана на этом участке водохранилища, полученной методом плавучих камер (в июле–сентябре 2024 г.), в соответствии с которой удельный поток с акватории варьировал от 0 до $74,1$ мг CH_4 м⁻²сут⁻¹, в среднем составляя $22,9 \pm 16,2$ мг CH_4 м⁻²сут⁻¹ (Никитин и др., 2025б), а также согласуются с результатами натурных измерений на водохранилищах Волжско-Камского каскада (Гречушников и др., 2023).

Летний и раннеосенний периоды характеризуются высокими температурами воды (Латыпова и др., 2023; Никитин и др., 2025б), которые ускоряют микробную продукцию метана в придонных анаэробных слоях воды и донных отложениях. Повышенная температура также усиливает диффу-

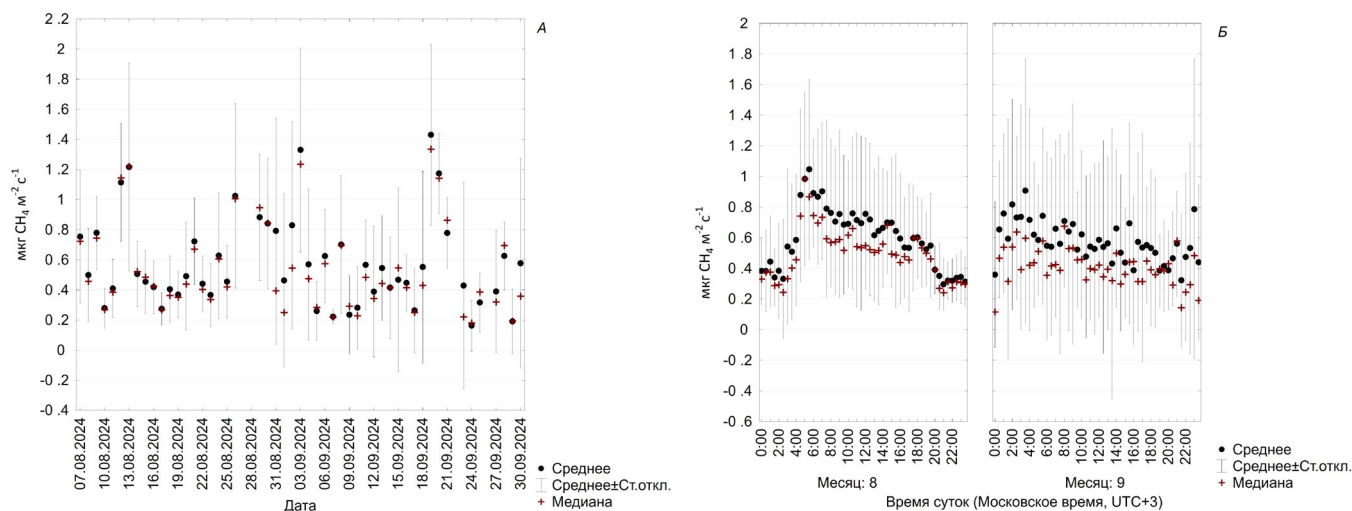


Рис.4. Оценка суточных (А) и субсуточных (Б) потоков метана (мкг CH_4 м⁻²с⁻¹) методом турбулентных пульсаций в акватории водного участка карбонового полигона (август–сентябрь 2024 г.).

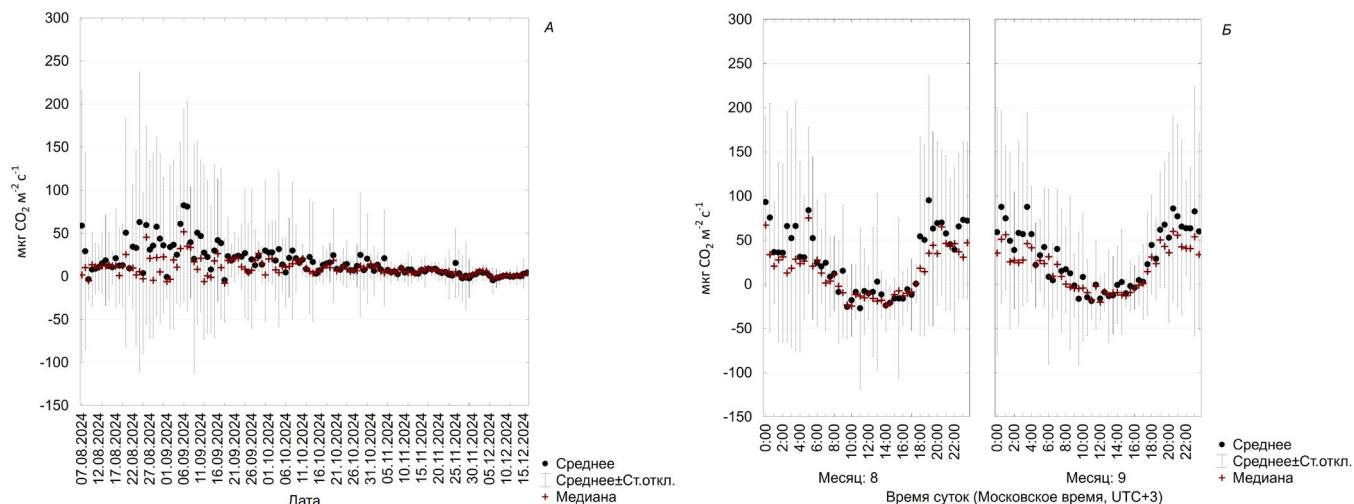


Рис.5. Оценка суточных (А) и субсуточных (Б) потоков углекислого газа ($\text{мкг CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$) методом турбулентных пульсаций в акватории водного участка карбонового полигона (август–декабрь 2024 г.).

зию CH_4 из воды в атмосферу за счет высокой турбулентности в поверхностном слое воды, а тепловое перемешивание и ветровое волнение способствуют эффективному турбулентному переносу CH_4 к границе воздух–вода. Это приводит к активным выбросам метана из воды в атмосферу. Схожие результаты сезонной динамики наблюдаются и в других водоёмах мира (Huotari et al., 2011; Jensen et al., 2022; Hounshell et al., 2023), где пик эмиссии парниковых газов также приходится на конец лета – начало осени. Это, вероятно, может являться характерным паттерном для водоёмов умеренного климата.

В позднелетний период (октябрь–ноябрь) в ряде случаев регистрировались отрицательные значения потока CH_4 , что может указывать на возможность кратковременного переноса газа из атмосферы в водоём. Однако интерпретация этих данных требует осторожности, поскольку наблюдаемая картина могла отражать как реальные процессы газообмена, так и методические особенности измерений. Подобные явления, хотя и упоминаются в литературе при использовании метода турбулентных

пульсаций (Schubert et al., 2012; Erkkilä et al., 2018), требуют тщательного анализа, особенно в отсутствие прямых данных о парциальном давлении CH_4 в атмосферном и водном слоях.

С одной стороны, нельзя исключить возможность кратковременного стока метана из атмосферы, связанного с сезонным ростом фоновых концентраций CH_4 (Nikitin et al., 2024a; Nikitin et al., 2024b), понижением температуры воды и изменением баланса между продукцией и окислением метана. С другой стороны, следует учитывать технические ограничения: в отличие от закрытого газоанализатора LI-7200RS, применявшегося для измерения CO_2 , метан регистрировался открытым газоанализатором LI-7700, показания которого в холодный период года необходимо рассматривать с определённой долей осторожности. Дополнительно нельзя исключить и влияние загрязнения оптики (несмотря на наличие встроенного оmyающего устройства для очистки нижнего зеркала) – в октябре и ноябре сила сигнала прибора была на низком уровне, что потребовало программного усиления и

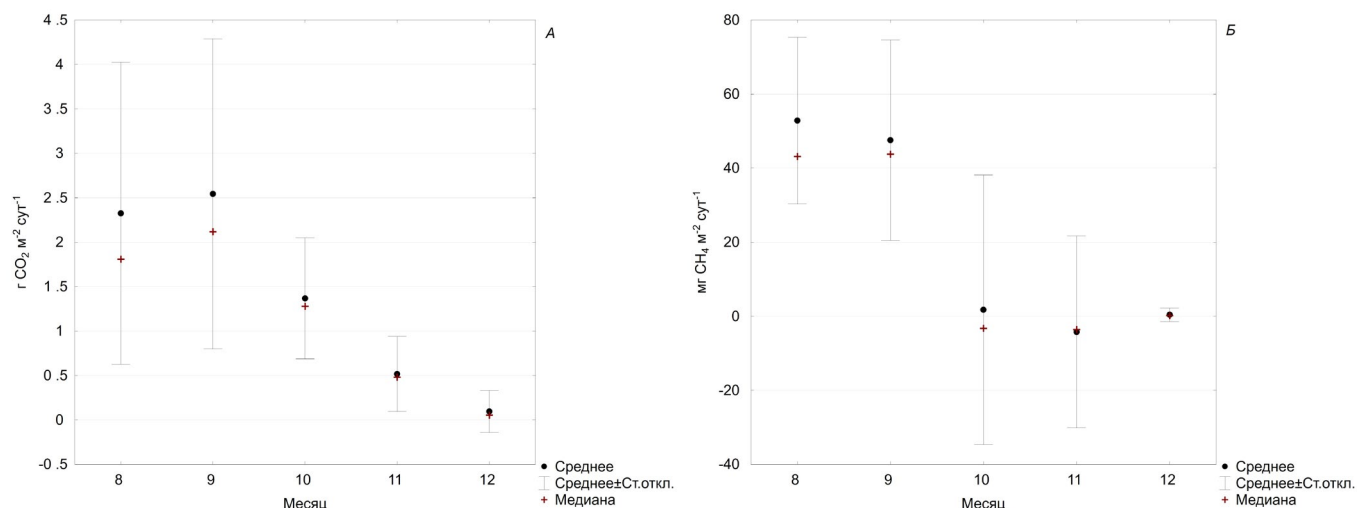


Рис.6. Оценка среднемесячных значений потоков парниковых газов (углекислого газа (А), $\text{г CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$; метана (Б), $\text{мг CH}_4 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$) методом турбулентных пульсаций в акватории водного участка карбонового полигона за период с августа по декабрь 2024 г. Данные по потокам CH_4 за октябрь и ноябрь следует интерпретировать с осторожностью из-за повышенной неопределённости измерений (см. пояснения в тексте).

могло повлиять на точность измерений. Для уточнения характера и механизмов этих процессов в дальнейшем необходимы дополнительные исследования, включающие прямые параллельные измерения концентраций метана в воде и атмосфере, а также оценку активности метанотрофных и метаногенных микробных сообществ.

В зимний период установление ледового покрова существенно ограничивает газообмен, что в декабре привело к стабилизации потоков парниковых газов около нулевых значений. Полученные результаты подчёркивают сложный характер сезонной динамики потоков ПГ в водохранилище, обусловленной сочетанием биологических, физико-химических и метеорологических факторов, включая температуру, ветровое воздействие и ледостав, которые совместно определяют поведение CH_4 и CO_2 на границе раздела вода–атмосфера.

4. Выводы

Первичные результаты экспериментальной оценки потоков парниковых газов на Куйбышевском водохранилище, выполненные с использованием метода турбулентных пульсаций, выявили характерные амплитуды потоков, а также закономерности их суточной и сезонной динамики. Летне-осенний период сопровождается выраженной эмиссией метана, тогда как для углекислого газа отмечается дневной сток в тёплые месяцы (август–сентябрь). Сезонная динамика определяется комплексом биологических, физико-химических и метеорологических факторов. Полученные данные подтверждают характерные тренды, ранее описанные для других водоёмов умеренного пояса, однако вносят вклад в их уточнение за счёт непрерывных и высокочастотных измерений методом ЕС. Применение данного метода позволяет выявить кратковременные пиковые эмиссии и обратные потоки, которые могут быть упущены при использовании расчётных или камерных подходов. Это, в свою очередь, критически важно для корректной оценки вклада водохранилищ в региональный и глобальный углеродный баланс. Без использования метода ЕС масштабы эмиссий метана, особенно в периоды высокой турбулентности или при изменении градиентов концентраций, вероятно, были бы существенно недооценены. Дальнейшее расширение сети стационарных ЕС-пунктов на водоёмах различного типа и в разных климатических зонах может позволить существенно повысить точность глобальных оценок потоков CH_4 и CO_2 с континентальных водных поверхностей.

Благодарности

Исследование выполнено за счёт средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Список литературы

- Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А., Куричева О.А. и др. 2016. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. Москва: LI-COR Biosciences, РАН. ISBN: 978-0-692-57831-5.
- Гречушникова М.Г., Репина И.А., Фролова Н.Л. и др. 2023. Содержание и потоки метана в Волжских водохранилищах. Известия РАН. Серия географическая 87(6): 899–913. DOI: [10.31857/S2587556623060080](https://doi.org/10.31857/S2587556623060080)
- Латыпова В.З., Степанова Н.Ю., Кондратьева Т.А. и др. 2023. Мониторинг поверхностных вод Куйбышевского водохранилища в районе водного участка полигона «Карбон – Поволжье». Российский журнал прикладной экологии 4(36): 39–49. DOI: [10.24852/2411-7374.2023.4.39.49](https://doi.org/10.24852/2411-7374.2023.4.39.49)
- Никитин О.В., Латыпова В.З., Степанова Н.Ю. и др. 2022. Водный участок карбонового полигона «Карбон – Поволжье» в Республике Татарстан. В: Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем. Киров: ВятГУ, С. 28–33. ISBN: 978-5-98228-258-3.
- Никитин О.В., Степанова Н.Ю., Кондратьева Т.А. и др. 2024. Пространственно-временная динамика «цветения» фитопланктона в Куйбышевском водохранилище по данным спутникового зондирования. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса 21(6): 284–293. DOI: [10.21046/2070-7401-2024-21-6-284-293](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-6-284-293)
- Никитин О.В., Степанова Н.Ю., Кузьмин Р.С. и др. 2025. Оценка эмиссии парниковых газов от Куйбышевского водохранилища с использованием модели G-res. В: Озера Евразии: проблемы и пути их решения. Казань: АН РТ, С. 459–464. ISBN: 978-5-9690-1336-0.
- Никитин О.В., Степанова Н.Ю., Шевчук К.А. и др. 2025. Оценка эмиссии метана в мелководной зоне Куйбышевского водохранилища методом плавучих камер. В: Актуальные проблемы экологии и природопользования. Москва: РУДН, С. 327–331. ISBN: 978-5-209-12647-8.
- Согачев А.Ф., Репина И.А., Кожевников М.В. и др. 2024. Оценка области воздействия на газообмен водоем-атмосфера в прибрежной зоне: на примере водного участка полигона «Карбон-Поволжье». В: Турбулентность, динамика атмосферы и климата. Москва: Физматкнига. ISBN: 978-5-89155-432-0.
- Baldocchi A.K., Reed D.E., Loken L.C. et al. 2020. Comparing spatial and temporal variation of lake-atmosphere carbon dioxide fluxes using multiple methods. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 125(12): e2019JG005623. DOI: [10.1029/2019jg005623](https://doi.org/10.1029/2019jg005623)
- Barros N., Cole J.J., Tranvik L.J. et al. 2011. Carbon emission from hydroelectric reservoirs linked to reservoir age and latitude. Nature Geoscience 4(9): 593–596. DOI: [10.1038/ngeo1211](https://doi.org/10.1038/ngeo1211)
- Bastviken D., Tranvik L.J., Downing J.A. et al. 2011. Freshwater methane emissions offset the continental carbon sink. Science 331(6013): 50. DOI: [10.1126/science.1196808](https://doi.org/10.1126/science.1196808)
- Bauduin T., Gypens N., Borges A.V. 2025. Sub-daily variability of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide emissions from two urban ponds in Brussels (Belgium). Journal of Environmental Management 373: 123627. DOI: [10.1016/j.jenvman.2024.123627](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123627)
- Beaulieu J.J., Waldo S., Balz D.A. et al. 2020. Methane and carbon dioxide emissions from reservoirs: controls and upscaling. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 125(12): e2019JG005474. DOI: [10.1029/2019jg005474](https://doi.org/10.1029/2019jg005474)

- Berberich M.E., Beaulieu J.J., Hamilton T.L. et al. 2019. Spatial variability of sediment methane production and methanogen communities within a eutrophic reservoir: importance of organic matter source and quantity. *Limnology and Oceanography* 65(6): 1336–1358. DOI: [10.1002/lno.11392](https://doi.org/10.1002/lno.11392)
- Berg P., Pace M.L., Buelo C.D. 2020. Air–water gas exchange in lakes and reservoirs measured from a moving platform by underwater eddy covariance. *Limnology and Oceanography: Methods* 18(8): 424–436. DOI: [10.1002/lom3.10373](https://doi.org/10.1002/lom3.10373)
- Burba G. 2022. Eddy covariance method for scientific, regulatory, and commercial applications. Lincoln, Nebraska: LI-COR Biosciences. ISBN: 978-0-578-97714-0.
- Deemer B.R., Harrison J.A., Li S. et al. 2016. Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis. *BioScience* 66(11): 949–964. DOI: [10.1093/biosci/biw117](https://doi.org/10.1093/biosci/biw117)
- Deemer B.R., Harrison J.A., Li S. et al. 2020. Data from: Greenhouse gas emissions from reservoir water surfaces: a new global synthesis [Dataset]. Dryad. DOI: [10.5061/dryad.d2kv0](https://doi.org/10.5061/dryad.d2kv0)
- Erkkilä K.M., Ojala A., Bastviken D. et al. 2018. Methane and carbon dioxide fluxes over a lake: comparison between eddy covariance, floating chambers and boundary layer method. *Biogeosciences* 15(2): 429–445. DOI: [10.5194/bg-15-429-2018](https://doi.org/10.5194/bg-15-429-2018)
- Erland B.M., Thorpe A.K., Gamon J.A. 2022. Recent advances toward transparent methane emissions monitoring: a review. *Environmental Science & Technology* 56(23): 16567–16581. DOI: [10.1021/acs.est.2c02136](https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02136)
- Eugster W., Kling G., Jonas T. et al. 2003. CO₂ exchange between air and water in an Arctic Alaskan and midlatitude Swiss lake: Importance of convective mixing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 108(D12): 1–20. DOI: [10.1029/2002jd002653](https://doi.org/10.1029/2002jd002653)
- Flerlage H., Velders G.J.M., de Boer J. 2021. A review of bottom-up and top-down emission estimates of hydrofluorocarbons (HFCs) in different parts of the world. *Chemosphere* 283: 131208. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2021.131208](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131208)
- Gafurov A., Usmanov B., Khomyakov P. 2024. Modelling of Kuibyshev reservoir shallow water depths by bathymetric surveys and multispectral UAV imagery data: a case study. *BIO Web of Conferences* 126: 01047. DOI: [10.1051/bioconf/202412601047](https://doi.org/10.1051/bioconf/202412601047)
- Goldenfum J.A. 2010. GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs. London: International Hydropower Association (IHA). ISBN 978-0-9566228-0-8.
- Golub M., Koupaei-Abyazani N., Vesala T. et al. 2023. Diel, seasonal, and inter-annual variation in carbon dioxide effluxes from lakes and reservoirs. *Environmental Research Letters* 18(3): 034046. DOI: [10.1088/1748-9326/acb834](https://doi.org/10.1088/1748-9326/acb834)
- Gruca-Rokosz R., Cieśla M. 2021. Sediment methane production within eutrophic reservoirs: the importance of sedimenting organic matter. *Science of The Total Environment* 799: 149219. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2021.149219](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149219)
- Hamdan L.J., Wickland K.P. 2016. Methane emissions from oceans, coasts, and freshwater habitats: New perspectives and feedbacks on climate. *Limnology and Oceanography* 61(S1): S3–S12. DOI: [10.1002/lno.10449](https://doi.org/10.1002/lno.10449)
- Harrison J.A., Prairie Y.T., Mercier-Blais S. et al. 2021. Year-2020 global distribution and pathways of reservoir methane and carbon dioxide emissions according to the greenhouse gas from reservoirs (G-res) model. *Global Biogeochemical Cycles* 35(6): e2020GB006888. DOI: [10.1029/2020gb006888](https://doi.org/10.1029/2020gb006888)
- Hounshell A.G., D'Aunha B.M., Breef-Pilz A. et al. 2023. Eddy covariance data reveal that a small freshwater reservoir emits a substantial amount of carbon dioxide and methane. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 128(3): e2022JG007091. DOI: [10.1029/2022jg007091](https://doi.org/10.1029/2022jg007091)
- Huotari J., Ojala A., Peltomaa E. et al. 2011. Long-term direct CO₂ flux measurements over a boreal lake: five years of eddy covariance data. *Geophysical Research Letters* 38(18): L18401. DOI: [10.1029/2011gl048753](https://doi.org/10.1029/2011gl048753)
- Iakunin M., Stepanenko V., Salgado R. et al. 2020. Numerical study of the seasonal thermal and gas regimes of the largest artificial reservoir in western Europe using the LAKE 2.0 model. *Geoscientific Model Development* 13(8): 3475–3488. DOI: [10.5194/gmd-13-3475-2020](https://doi.org/10.5194/gmd-13-3475-2020)
- IPCC. 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K. et al. (Eds). Japan: IGES. ISBN 4-88788-032-4. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html> (accessed: 22.07.2025)
- Isidorova A., Grasset C., Mendonça R. et al. 2019. Methane formation in tropical reservoirs predicted from sediment age and nitrogen. *Scientific Reports* 9(1): 1–9. DOI: [10.1038/s41598-019-47346-7](https://doi.org/10.1038/s41598-019-47346-7)
- Jensen S.A., Webb J.R., Simpson G.L. et al. 2022. Seasonal variability of CO₂, CH₄, and N₂O content and fluxes in small agricultural reservoirs of the northern Great Plains. *Frontiers in Environmental Science* 10: 895531. DOI: [10.3389/fenvs.2022.895531](https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.895531)
- Johnson M.S., Matthews E., Bastviken D. et al. 2021. Spatiotemporal methane emission from global reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 126(8): e2021JG006305. DOI: [10.1029/2021jg006305](https://doi.org/10.1029/2021jg006305)
- Lehner B., Liermann C.R., Revenga C. et al. 2011. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(9): 494–502. DOI: [10.1890/100125](https://doi.org/10.1890/100125)
- Liu B., Li Z., Wang J. et al. 2023. Thin boundary layer model underestimates greenhouse gas diffusion from inland waterways. *Environmental Research* 233: 116472. DOI: [10.1016/j.envres.2023.116472](https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116472)
- Lomov V., Stepanenko V., Grechushnikova M. et al. 2024. Mechanistic modeling of the variability of methane emissions from an artificial reservoir. *Water* 16(1): 76. DOI: [10.3390/w16010076](https://doi.org/10.3390/w16010076)
- Lomov V.A. 2021. Methods for instrumental assessment of methane emission in reservoirs. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 8 34(1): 012032. DOI: [10.1088/1755-1315/834/1/012032](https://doi.org/10.1088/1755-1315/834/1/012032)
- Lorke A., Bodmer P., Noss C. et al. 2015. Technical note: drifting versus anchored flux chambers for measuring greenhouse gas emissions from running waters. *Biogeosciences* 12(23): 7013–7024. DOI: [10.5194/bg-12-7013-2015](https://doi.org/10.5194/bg-12-7013-2015)
- Long M.H. 2021. Aquatic biogeochemical eddy covariance fluxes in the presence of waves. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 126(2): e2020JC016637. DOI: [10.1029/2020JC016637](https://doi.org/10.1029/2020JC016637)
- Ma S., Worden J.R., Bloom A.A. et al. 2021. Satellite constraints on the latitudinal distribution and temperature sensitivity of wetland methane emissions. *AGU Advances* 2(3): e2021AV000408. DOI: [10.1029/2021av000408](https://doi.org/10.1029/2021av000408)
- Martínez-García A., Peralta-Maraver I., Rodríguez-Velasco E. et al. 2024. Particulate organic carbon sedimentation triggers lagged methane emissions in a eutrophic reservoir. *Limnology and Oceanography Letters* 9(3): 247–257. DOI: [10.1002/lol2.10379](https://doi.org/10.1002/lol2.10379)
- Moras S., Zellmer U.R., Hiltunen E. et al. 2024. Predicting methane formation rates of freshwater sediments in different biogeographic regions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 129(1): e2023JG007463. DOI: [10.1029/2023jg007463](https://doi.org/10.1029/2023jg007463)
- Morin T.H., Bohrer G., Naor-Azrieli L. et al. 2014. The seasonal and diurnal dynamics of methane flux at a created urban wetland. *Ecological Engineering* 72: 74–83. DOI: [10.1016/j.ecoleng.2014.02.002](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.02.002)

- Naslund L.C., Mehring A.S., Rosemond A.D. et al. 2024. Toward more accurate estimates of carbon emissions from small reservoirs. *Limnology and Oceanography* 69(6): 1350–1364. DOI: [10.1002/lno.12577](https://doi.org/10.1002/lno.12577)
- Nicholls D., Barnes F., Acrea F. et al. 2015. Top-down and bottom-up approaches to greenhouse gas inventory methods – a comparison between national- and forest-scale reporting methods. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-906. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Kuzmin R.S. et al. 2024. Estimation of atmospheric methane levels over the Republic of Tatarstan (Russia) territory in 2019–2023 using satellite remote sensing data: effects of anthropogenic and climate drivers. *E3S Web of Conferences* 498: 02008. DOI: [10.1051/e3sconf/202449802008](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449802008)
- Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Gubeeva S.S. et al. 2024. Assessment of methane levels throughout a temperate reservoir area using remote sensing data. *E3S Web of Conferences* 555: 01009. DOI: [10.1051/e3sconf/202455501009](https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455501009)
- Pilla R.M., Faehndrich C.S., Fortner A.M. et al. 2024. Shifts in carbon emissions versus sequestration from hydropower reservoirs in the southeastern United States. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 129(7): e2023JG007580. DOI: [10.1029/2023jg007580](https://doi.org/10.1029/2023jg007580)
- Podgrajsek E., Sahlée E., Bastviken D. et al. 2014. Comparison of floating chamber and eddy covariance measurements of lake greenhouse gas fluxes. *Biogeosciences* 11(15): 4225–4233. DOI: [10.5194/bg-11-4225-2014](https://doi.org/10.5194/bg-11-4225-2014)
- Podgrajsek E., Sahlée E., Rutgersson A. 2014. Diurnal cycle of lake methane flux. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 119(3): 236–248. DOI: [10.1002/2013jg002327](https://doi.org/10.1002/2013jg002327)
- Podgrajsek E., Sahlée E., Rutgersson A. 2015. Diel cycle of lake-air CO₂ flux from a shallow lake and the impact of waterside convection on the transfer velocity. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 120(1): 29–38. DOI: [10.1002/2014jg002781](https://doi.org/10.1002/2014jg002781)
- Rosentreter J.A., Borges A.V., Deemer B.R. et al. 2021. Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nature Geoscience* 14(4): 225–230. DOI: [10.1038/s41561-021-00715-2](https://doi.org/10.1038/s41561-021-00715-2)
- Scholz K., Ejarque E., Hammerle A. et al. 2021. Atmospheric CO₂ exchange of a small mountain lake: limitations of eddy covariance and boundary layer modeling methods in complex terrain. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 126(7): e2021JG006286. DOI: [10.1029/2021jg006286](https://doi.org/10.1029/2021jg006286)
- Schubert C.J., Diem T., Eugster W. 2012. Methane emissions from a small wind shielded lake determined by eddy covariance, flux chambers, anchored funnels, and boundary model calculations: a comparison. *Environmental Science & Technology* 46(8): 4515–4522. DOI: [10.1021/es203465x](https://doi.org/10.1021/es203465x)
- Semerjian H.G., Wong T.M., Whetstone J.R. 2024. NIST greenhouse gas measurements program: a decade of critical accomplishments. NIST Technical Note (TN) 2291. DOI: [10.6028/nist.tn.2291](https://doi.org/10.6028/nist.tn.2291)
- Shahady T. 2024. Hydropower reservoirs as arbiters of climate change. In: *Inland Waters – Ecology, Limnology, and Environmental Protection*. IntechOpen. DOI: [10.5772/intechopen.1005111](https://doi.org/10.5772/intechopen.1005111)
- St. Louis V.L., Kelly C.A., Duchemin É. et al. 2000. Reservoir surfaces as sources of greenhouse gases to the atmosphere: a global estimate. *BioScience* 50(9): 766. DOI: [10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0766:rsasog\]2.0.co;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0766:rsasog]2.0.co;2)
- Stepanenko V., Mammarella I., Ojala A. et al. 2016. LAKE 2.0: A model for temperature, methane, carbon dioxide and oxygen dynamics in lakes. *Geoscientific Model Development* 9(5): 1977–2006. DOI: [10.5194/gmd-9-1977-2016](https://doi.org/10.5194/gmd-9-1977-2016)
- Stepanenko V.M., Machul'skaya E.E., Glagolev M.V. et al. 2011. Numerical modeling of methane emissions from lakes in the permafrost zone. *Izvestiya - Atmospheric and Oceanic Physics* 47(2): 252–264. DOI: [10.1134/s0001433811020113](https://doi.org/10.1134/s0001433811020113)
- Thirkill R.H., Ramón C.L., Oldroyd H.J. et al. 2024. Navigating greenhouse gas emission unknowns: a hydro-acoustic examination of mediterranean climate reservoirs. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 129(12): e2024JG008080. DOI: [10.1029/2024jg008080](https://doi.org/10.1029/2024jg008080)
- Thottathil S.D., Reis P.C.J., Prairie Y.T. 2019. Methane oxidation kinetics in northern freshwater lakes. *Biogeochemistry* 143: 105–116. DOI: [10.1007/s10533-019-00552-x](https://doi.org/10.1007/s10533-019-00552-x)
- Varis O., Kumm M., Härkönen S. et al. 2012. Greenhouse gas emissions from reservoirs. In: Tortajada C., Altinbilek D., Biswas A. (Eds), *Impacts of Large Dams: A Global Assessment*. Berlin: Springer, pp. 69–94. ISBN: 978-3-642-23570-2. DOI: [10.1007/978-3-642-23571-9_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-23571-9_4)
- Vesala T., Eugster W., Ojala A. 2012. Eddy covariance measurements over lakes. In: Aubinet M., Vesala T., Papale D. (Eds), *Eddy Covariance*. Dordrecht: Springer, pp. 365–376. ISBN: 978-94-007-2350-4. DOI: [10.1007/978-94-007-2351-1_15](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1_15)
- Waldo S., Beaulieu J.J., Barnett W. et al. 2021. Temporal trends in methane emissions from a small eutrophic reservoir: the key role of a spring burst. *Biogeosciences* 18: 5291–5311. DOI: [10.5194/bg-18-5291-2021](https://doi.org/10.5194/bg-18-5291-2021)
- Yang P., Huang J., Yang H. et al. 2021. Diffusive CH₄ fluxes from aquaculture ponds using floating chambers and thin boundary layer equations. *Atmospheric Environment* 253: 118384. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2021.118384](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118384)
- Zhang S., Ma J., Zhang X. et al. 2023. Atmospheric remote sensing for anthropogenic methane emissions: Applications and research opportunities. *Science of The Total Environment* 893: 164701. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.164701](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164701)