

Autonomous buoy station at a carbon measurement supersite: integrated monitoring of the freshwater ecosystem and greenhouse gas fluxes

Nikitin O.V.^{1*}, Kuzmin R.S.¹, Potapov K.O.², Shevchuk K.A.², Latypova V.Z.²

¹Ekoaudit LLC, 4-y Ochakovsky Pereulok, 3, Moscow, 119361, Russia

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

ABSTRACT. This paper presents the experience of deploying an autonomous buoy station (ABS) for high-frequency real-time monitoring of water quality parameters and dissolved greenhouse gases (CH₄ and CO₂) at the Volga Carbon Supersite (Kuibyshev Reservoir, Russia). Lowland reservoirs are important sources of greenhouse gases, yet their contribution to regional carbon budgets remains constrained by the lack of continuous, synchronized observations. To the best of our knowledge, for the first time in Russia, a YSI EXO2s multiparameter sonde was integrated with direct in situ sensors for methane (METS) and carbon dioxide (AMT) on a single autonomous platform based on the Daowan buoy. The developed hardware-software architecture includes 4G data transmission, a multithreaded Python TCP server, and long-term storage in PostgreSQL with the TimescaleDB extension, enabling data synchronization at 4-minute resolution. Interactive monitoring and visualization were implemented using Grafana. During the deployment period from July to October 2025, the system collected approximately 35,000 records, providing a detailed assessment of diurnal and seasonal dynamics. The results revealed short-term peaks in dissolved methane concentrations, potentially associated with episodic ebullition events, which are typically missed by discrete sampling methods. Integration of the ABS with eddy covariance systems and floating chambers enables cross-verification of flux data and the calibration of regional bio-optical and emission models. The proposed ABS architecture and technical solutions serve as a reference design for the development of integrated greenhouse gas monitoring networks on inland water bodies.

Keywords: autonomous buoy station, carbon measurement supersite, CH₄, CO₂, greenhouse gases, Kuibyshev Reservoir

For citation: Nikitin O.V., Kuzmin R.S., Potapov K.O., Shevchuk K.A., Latypova V.Z. Autonomous buoy station at a carbon measurement supersite: integrated monitoring of the freshwater ecosystem and greenhouse gas fluxes // Limnology and Freshwater Biology. 2026. — No. 5. — P. 711–741. DOI: [10.31951/2658-3518-2026-A-5-711](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2026-A-5-711)

1. Introduction

Aquatic ecosystems play a dual role in the global carbon cycle as both organic matter sinks and significant greenhouse gas (GHG) sources (Beaulieu et al., 2020; Santos et al., 2022; Song et al., 2024; Wang et al., 2026). Lowland reservoirs are particularly prone to enhanced emissions due to their shallow depths, high trophic status, and regulated hydrological regimes (Bastviken and Johnson, 2025; Bodmer et al., 2025; Fedorov et al., 2024; Rabaey et al., 2026). The Kuibyshev Reservoir—the largest in the Volga-Kama cascade and one of the largest reservoirs worldwide—represents a major potential source of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂).

However, quantitative estimates remain constrained by insufficient continuous observations.

Although floating chambers (FC), eddy covariance (EC), and modeling studies (Grechushnikova et al., 2023; Nikitin et al., 2025a, 2025b, 2026b) have confirmed substantial emissions, each approach has inherent limitations (Erkkilä et al., 2018). FC provide accurate point measurements but lack the temporal resolution to capture episodic events such as methane ebullition triggered by wind-driven mixing or pressure changes, and their limited spatial coverage complicates assessing site representativeness. Conversely, EC delivers continuous, spatially integrated fluxes but does not directly measure dissolved gas concentrations in the

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

Received: July 02, 2026;

Accepted after revised: September 28, 2026;

Available online: October 29, 2026

© Author(s) 2026. This work is distributed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



water column. Modeling provides integrated estimates but relies on parameterizations that require validation with high-frequency in situ data, particularly for bubble-mediated transport. This creates a critical data gap, complicating the establishment of causal links between biogeochemical processes (e.g., methanogenesis, photosynthesis, and respiration) and observed atmospheric emissions. Addressing this gap requires synchronized, high-frequency measurements of dissolved CH₄ and CO₂ coupled with key environmental drivers (Lami et al., 2025; Nazarious et al., 2023; Spank et al., 2023; Yoon et al., 2016).

Since 2021, Russia has been developing a national network of carbon measurement supersites aimed at advancing carbon balance monitoring and verifying GHG flux data (Olchev and Gulev, 2024; Zakharova et al., 2026). The Volga Carbon Supersite (Republic of Tatarstan) represents a rare example of integrated terrestrial and aquatic monitoring (Nikitin et al., 2022). In this context, the Kuibyshev Reservoir is considered not merely a conduit but an active biogeochemical reactor influencing the regional carbon budget.

Though autonomous buoy stations (ABS) are widely used for standard water quality monitoring (temperature, pH, chlorophyll, etc.) (Aslamov et al., 2020; Błazejewski et al., 2024; Makarov et al., 2021; Marcé et al., 2016; Rogora et al., 2023; Voronich et al., 2024; Zhang et al., 2026), dissolved GHG measurements remain notably less frequent. Traditionally, these are performed using gas-water equilibrators, which prevent direct contact with water but impose supplementary power and maintenance requirements (Abril et al., 2006; Pestunov et al., 2008, 2025; Yoon et al., 2016). Despite their reliability, such systems are less suitable for long-term autonomous deployment due to their mechanical complexity and energy demands.

An alternative is direct (in situ) measurement using semiconductor (METS) or optical (NDIR) sensors (Boulart et al., 2010; Leng et al., 2025; Liu et al., 2023). This simplifies design by placing sensors directly in the water column but introduces challenges like biofouling, temperature dependence, and high-power consumption of heated or active sensing elements. Integrating multiparameter probes with CH₄ and CO₂ sensors on a single autonomous platform remains technically difficult. Only a limited number of systems (Koschorreck et al., 2024; Loken et al., 2019; Reed et al., 2018; Spank et al., 2023) were reported to integrate a broad suite of water chemistry parameters and long-term monitoring capabilities. However, these systems often rely on disparate detection principles or are limited to short-term operational periods. To date, no such system has been reported for the Kuibyshev Reservoir or for the inland waters of the Volga region.

To address these limitations, an ABS was deployed at the Volga Carbon Supersite. This paper describes its architecture and operational performance, focusing on: the integration of EXO2s, METS, and AMT sensors; the data management framework (multithreaded Python server, PostgreSQL with TimescaleDB, and Grafana); and methods for synchronizing ABS data with EC and FC measurements.

The novelty of this study lies in: (1) the first integration in Russia of a high-frequency multiparameter YSI EXO2s sonde with direct in situ sensors for dissolved CH₄ (METS) and CO₂ (AMT) on a single autonomous buoy platform; (2) the development of a hardware-software framework for real-time data acquisition and visualization; and (3) the implementation of data synchronization algorithms (4-min resolution) specifically designed for direct comparison with EC observations. The proposed ABS architecture serves as a reference design for regional GHG monitoring networks on inland water bodies.

2. Materials and methods

2.1. Study area

The Kuibyshev Reservoir (53°20′-56°10′N, 47°30′-51°30′E) is a large eutrophic water body in European Russia, formed by the Zhiguli Hydroelectric Station. It has a surface area of 5,900 km², a volume of 57.3 km³, and a mean depth of 9.7 m (Kuibyshev..., 2008). The reservoir is characterized by extensive shallow-water areas and high biological productivity, which promote intensive organic matter decomposition and active GHG emissions (Grechushnikova et al., 2023; Dziuban, 2016; Nikitin et al., 2024b, 2025a, 2025b, 2025c, 2026b).

The ABS was deployed and operated in the Kuibyshev Reservoir within the Volga Carbon Supersite (55°16′09.7″N, 49°16′48.7″E; Fig. 1) from 12 July to 24 October 2025. The supersite is located within the Saraly section of the Volzhsko-Kamsky State Nature Biosphere Reserve (a UNESCO-designated protected area of international importance), which occupies a peninsula extending 4-5 km into the Volga-Kama reach of the reservoir. The site is characterized by its remoteness from anthropogenic sources and experiences minimal impact due to strict nature reserve regulations, including restricted navigation. Previous studies indicate that its hydrochemical conditions are representative of open reservoir environments and can be considered background (Nikitin et al., 2022; Latypova et al., 2023).

The surrounding aquatic environment represents an open, shallow-water zone with depths ranging from 2 to 4 m, depending on the water level. Bottom sediments consist predominantly of sand and silty sand with detrital material. Organic matter content, estimated by loss on ignition, ranges from 1.0% to 9.6% (median 1.4%), which is typical for open areas of the reservoir. Extensive macrophyte vegetation is absent (Nikitin et al., 2026b). The eutrophic status of the reservoir, combined with high nutrient loading from the watershed (Korneva et al., 2025; Mineeva et al., 2022, 2025; Minakova et al., 2025; Pozdnyakov and Kondratyev, 2022; Selezneva et al., 2018), promotes intensive organic matter decomposition, which in turn drives active GHG production in the sediments and subsequent degassing (Dziuban, 2016; Nikitin et al., 2025b). The site is subject to active wind-driven mixing; however, under calm conditions, thermal stratification may develop, with a thermocline forming at depths of 2-3 m. Such conditions promote local near-bottom

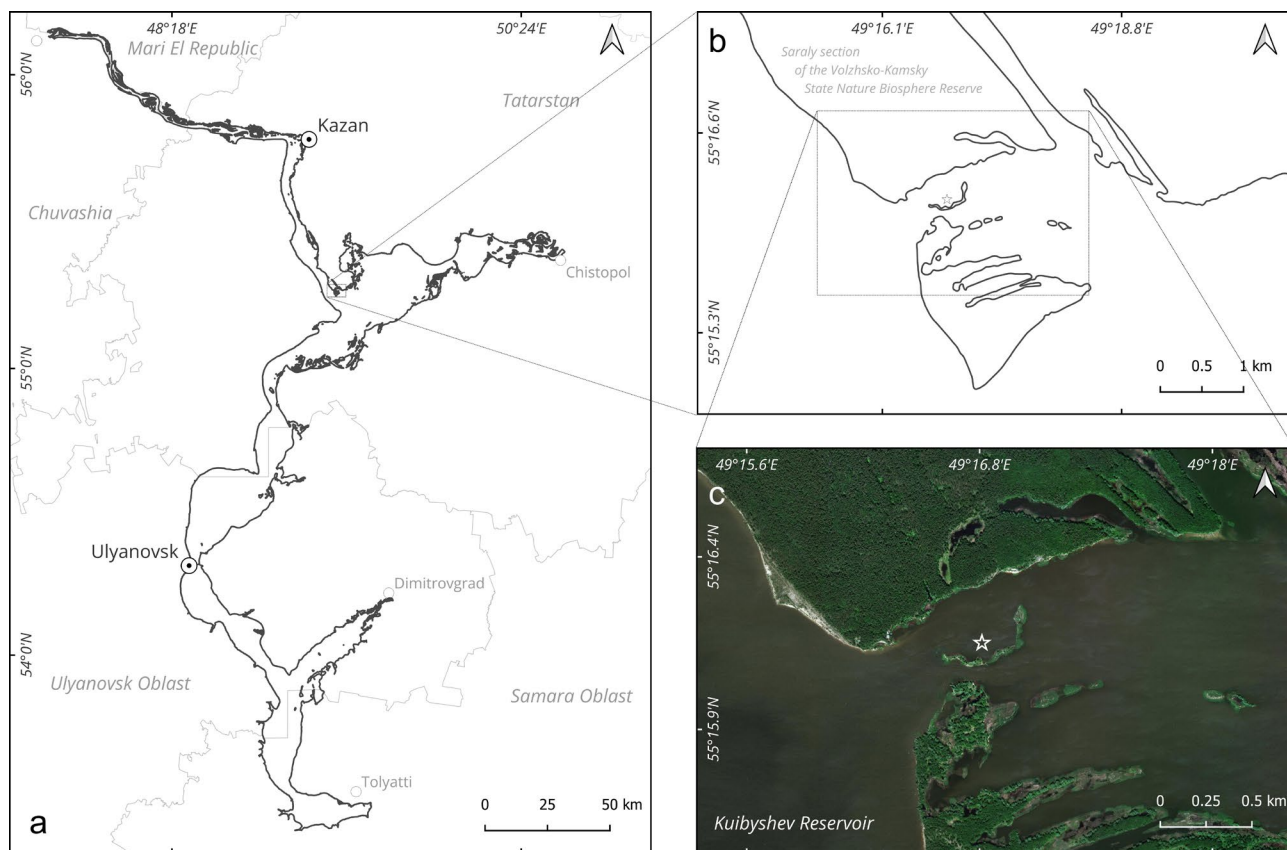


Fig. 1. Study site: (a) Kuibyshev Reservoir location; (b) Volga Carbon Supersite (Saraly); (c) ABS deployment site (★).

hypoxic or anoxic zones that stimulate methanogenesis in the sediments (Nikitin et al., 2026b).

Three main factors motivated the selection of this site for ABS deployment. First, its location within the carbon supersite enables integration with complementary observational approaches, including EC and FC measurements (Nikitin et al., 2025a, 2026b), satellite observations (Nikitin et al., 2024a, 2024b), and surveys using unmanned aerial and surface vehicles (UAVs and USVs) (Gafurov et al., 2024; Khomyakov and Usmanov, 2025). Second, the site represents the shallow-water zone of the reservoir, allowing extrapolation of results to similar areas. Third, the availability of a long-term water quality dataset (2018-2025) provides a robust basis for analyzing interannual variability.

2.2. ABS design and power supply architecture

The ABS is based on a Daowan platform (Qingdao Daowan Technology Co., Ltd., China), adapted for deployment in inland waters under irregular wave conditions. The modular, bolt-together design ensures ease of transport, as the platform can be disassembled into five to six sections that fit into a conventional passenger vehicle. This allows for assembly and seasonal maintenance by a crew of two to three specialists with no heavy machinery or lifting equipment.

The main structural components of the ABS are shown in Fig. 2:

1. Plastic floating hull (item 4)–toroidal, 60 cm in diameter, made of molded plastic. A sealed stainless-steel battery compartment is housed in the central cavity.

2. Metal protective frame (item 5)–a welded structure of two stainless-steel rings connected by vertical struts. It protects the hull and upper equipment from mechanical damage (e.g., floating debris or vessel impact).



Fig. 2. ABS schematic: 1–beacon; 2–control/transmission module; 3–solar panels; 4–buoyancy hull; 5–protective frame; 6–sensor housing; 7–EXO2s sonde; 8–METS sensor (with SBE 5M pump); 9–AMT sensor.

3. Cylindrical sensor housing (item 6)–38 cm in diameter and 80 cm in height, made of perforated stainless-steel sheet with a 10 mm hole diameter and 15 mm pitch; the bottom base of the housing is open. This configuration provides a free-flow area ratio of ~35% and unimpeded through-flow water exchange between the interior of the housing and the surrounding environment, preventing stagnation. The housing protects the sensors from coarse debris, mechanical impact of strong currents, and biofouling, and serves as a mounting enclosure for all measuring sensors.
4. Upper platform—a stainless-steel triangular structure (integrated with the battery compartment) supporting the three solar panels (item 3), the flashing beacon (item 1), and the primary control and data transmission module (item 2).
5. Flashing beacon GS-LS/C—an LED unit with a visibility range of up to 3 km at night, ensuring navigational safety under low-visibility conditions.
6. Measuring sensors (items 7-9) are installed at a fixed level of ~0.5 m below the water surface. This position remains stable regardless of water level fluctuations due to the sensors' rigid attachment to the hull. This specific depth was chosen to sample the upper optically active layer, which is relevant for satellite remote sensing and most sensitive to diurnal variations in photosynthesis and air–water gas exchange.

The submerged components (battery compartment and sensor housing), as well as the upper platform and load-bearing elements, are constructed from stainless steel to provide corrosion resistance during long-term operation. The ABS is moored by a chain to a stationary anchored floating platform (pontoon, 6 × 4 m), limiting its movement to a radius of approximately 1 m. Independent buoy anchoring is also possible as an alternative configuration where necessary.

To ensure uninterrupted autonomous operation, a direct-current photovoltaic (PV) system was implemented, comprising a PV array, a charge controller, and a battery. Electricity is generated by three AK Solar Panel modules (Ningbo Aike Electronic Technology Co., Ltd.), each rated at 20 W (total installed capacity 60 W). The panels are connected in parallel through built-in blocking diodes that prevent reverse currents from illuminated panels to shaded ones and are distributed in different azimuthal orientations. This arrangement optimizes the capture of diffuse radiation, maintains stable generation under partial shading, and extends effective operation into morning and evening hours, which is particularly important for maintaining the energy balance during periods of low insolation in autumn.

Energy storage is provided by a 12 V, 40 Ah sealed GEL lead–acid battery. The gel electrolyte was selected for its high tolerance to deep cyclic discharge, stable performance under wave-induced motion, and maintenance-free operation. Charge is regulated by a standard PWM controller with a rated current of 10 A

(12/24 V, max. 130 W at 12 V), protecting from overcharge and deep discharge. Owing to the azimuthal orientation of the panels and their limited total capacity (60 W), the actual peak charging current does not exceed the calculated value ($I_{\max} = 60 \text{ W} / 14 \text{ V} \approx 4.3 \text{ A}$), which corresponds to a conservative charging regime for a 40 Ah gel battery (recommended range 4–8 A).

The sensor package operates in a cyclic mode: an active phase (pump operation, sensor polling, and data transmission) alternates with a low-power sleep phase. The average power consumption is ~2.5 W, corresponding to a daily energy demand of ~60 Wh. Under regional insolation conditions (May–October), the estimated average daily energy yield from the solar panels is 170–190 Wh, which exceeds the demand by a factor of ~3. This ensures the full battery recharge even under overcast conditions. The usable battery reserve (assuming a 50% depth of discharge) is ~240 Wh ($12 \text{ V} \times 40 \text{ Ah} \times 0.5$), providing continuous operation for up to 96 hours (4 days) without solar recharge. Over four months of deployment (July–October 2025), the battery voltage, recorded by the buoy within each data packet, never dropped below 12.11 V, with average values ranging from 13.64 V (July) to 13.03 V (October), which confirms correct system operation without overcharge or deep discharge.

2.3. Instrumentation and measurement channels

The primary measurement channels of the ABS and their technical specifications are summarized in Table 1.

YSI EXO2s multiparameter sonde (Xylem, USA). The system utilizes a YSI EXO2s—a compact externally powered sonde designed for buoy integration. The system features seven universal ports, with six used for digital sensors and one for a central motorized wiper. To mitigate biofouling, the wiper performs a reciprocating motion during each wake-up cycle, ensuring data reliability during long-term deployment. The EXO2s directly measures temperature, conductivity, pH, ORP, DO, chlorophyll, phycocyanin, turbidity, and pressure. Chlorophyll-*a* and phycocyanin are primarily reported in Relative Fluorescence Units (RFU), as this format offers greater stability and is less affected by changes in phytoplankton species composition than calculated mass concentrations ($\mu\text{g L}^{-1}$). Specific conductivity (25°C), salinity, and water density are automatically derived from these measurements. Total dissolved solids (TDS) and total suspended solids (TSS) are calculated post-deployment using site-specific linear regressions against gravimetric measurements.

METS dissolved methane sensor (Franatech GmbH, Germany). The METS is a widely used instrument for in situ CH_4 measurements in aquatic environments (Boulart et al., 2010; Liu et al., 2023). It is a key component of the ABS, enabling direct determination of dissolved CH_4 concentrations rather than relying on proxy-based approaches. The sensor operates on a combination of membrane extraction and semiconductor

Table 1. ABS sensor specifications.

Parameter	Instrument	Method	Units	Range	Accuracy	Resolution
Water temperature	EXO2s	Thermistor	°C	0 to 50	± 0.2°C	0.001°C
Conductivity	EXO2s	4-electrode graphite	mS cm ⁻¹	0 to 100	± 1% or 2 µS cm ⁻¹	0.001-0.01 mS cm ⁻¹
pH	EXO2s	Glass electrode	pH units	0 to 14	± 0.1	0.01
ORP	EXO2s	Platinum electrode	mV	−999 to +999	± 20 mV	0.1 mV
Dissolved oxygen (DO)	EXO2s	Optical (luminescence)	mg L ⁻¹ ; % sat.	0-50 mg L ⁻¹ ; 0-500%	± 0.1 mg L ⁻¹ or ± 1%	0.01 mg L ⁻¹ ; 0.1%
Chlorophyll- <i>a</i>	EXO2s	Fluorometry (470 nm)	µg L ⁻¹ ; RFU	0-400 µg L ⁻¹ ; 0-100 RFU	Linearity <i>r</i> ² > 0.999*	0.01 RFU
Phycocyanin	EXO2s	Fluorometry (590 nm)	µg L ⁻¹ ; RFU	0-100 µg L ⁻¹ ; 0-100 RFU	Linearity <i>r</i> ² > 0.999*	0.01 RFU
Turbidity	EXO2s	Nephelometry (860 nm, 90°)	FNU	0 to 4000	± 0.3 FNU or ± 2%	0.01-0.1 FNU
Pressure (depth)	EXO2s	Strain gauge	bar, m	0 to 10	± 0.004 m	0.001 m
Dissolved CH ₄	METS	SnO ₂ semiconductor	µmol L ⁻¹	0.001 to 10	± 2%	0.1 nmol L ⁻¹
Dissolved CO ₂	AMT	Optical (NDIR)	% vol.; mg L ⁻¹	0 to 5	± 0.06 mg L ⁻¹	0.01 mg L ⁻¹
GPS position	Internal GPS	Satellite navigation	deg.	–	± 5 m	–
Battery voltage	Platform controller	Analog input	V	0 to 15	± 0.1 V	0.01 V

Notes: Compiled by the authors based on equipment technical data sheets; *–for the fluorometric channels (chlorophyll-*a* and phycocyanin), the “Accuracy” column indicates the linearity of the calibration characteristic against rhodamine WT (*r*² > 0.999), which ensures the reproducibility of the instrument signal.

detection. Dissolved CH₄ diffuses from the surrounding water through a semi-permeable silicone membrane into a sealed measurement chamber. The membrane allows rapid passage of CH₄ while effectively blocking water and dissolved ions. Within the chamber, a tin dioxide (SnO₂) sensing element—an n-type metal-oxide semiconductor—is heated to ~400°C using an integrated microheater. CH₄ adsorption at the sensor surface initiates a redox reaction with chemisorbed oxygen species on the heated sensor surface: CH₄ + 4O[−](ads) → CO₂ + 2H₂O + 4e[−]. The released electrons increase the charge carrier density in the surface layer, resulting in a drop in electrical resistance. This resistance change is proportional to the CH₄ partial pressure in the chamber and, hence, to its concentration in the surrounding water.

To ensure measurement stability and reduce sensitivity to hydrodynamic conditions (e.g., flow velocity and turbulence), the sensor is coupled to a forced flow-through system using an SBE 5M miniature submersible pump (model 05M.2220, Sea-Bird Scientific, USA). This configuration ensures a constant water exchange rate across the sensing membrane, minimizing response time lag and enabling the detection of low CH₄ concentrations that would otherwise remain below the detection threshold under passive diffusion conditions.

Both the SnO₂ sensing element and the silicone membrane exhibit strong temperature dependence; therefore, concentration cannot be derived using Henry’s law alone. The sensor incorporates an internal precision thermistor, and CH₄ concentrations are calculated using a manufacturer-provided two-factor calibration model with sensor-specific coefficients. This

approach provides automatic temperature compensation over the range of 2-25°C, ensuring an accuracy of ± 2% of the measured value.

Unlike the other ABS sensors, the METS sensor operates continuously throughout the deployment. This is required to maintain the operating temperature of the SnO₂ element. Following power up, the sensor requires a warm-up period of 10-30 min (depending on ambient conditions), during which measurements are unstable and unsuitable for analysis. Periodic power cycling would therefore result in substantial data loss. Continuous operation represents a deliberate trade-off between energy efficiency and data quality.

The sensor has a power consumption of approximately 1.44 W (120 mA at 12 V DC), accounting for > 50% of the station’s daily energy demand (~60 Wh). This constant load was explicitly accounted for in the design of the photovoltaic and battery subsystems to ensure reliable long-term operation.

AMT dissolved carbon dioxide sensor (Analyzenmesstechnik GmbH, Germany). Dissolved CO₂ was measured using a specialized AMT optical analyzer designed for the direct determination of CO₂ partial pressure in aquatic systems (Leng et al., 2025). The internal measurement chamber is separated from the surrounding water by a gas-permeable silicone membrane that allows the diffusion of gas molecules while preventing the ingress of liquid water and suspended particles. After equilibration of partial pressure across the membrane (typically within ~10 min), CO₂ concentration is determined using a single-beam, dual-wavelength NDIR (non-dispersive infrared) sensor. The dual-wavelength configuration incorporates an internal

reference channel, ensuring high stability by compensating for light source drift and optical interference.

The sensor is optimized for autonomous operation under low temperature conditions. To prevent condensation on optical components, the sensor head is equipped with an integrated heating system. Temperature compensation is applied internally to account for the temperature dependence of infrared absorption. Low-power consumption (<0.4 W) makes the instrument suitable for long-term autonomous deployment. Owing to its low-power demand and short warm-up time (<2 min), the sensor operates in a cyclic mode synchronized with the other measurement channels.

The measurement principle is highly selective and is not affected by dissolved silicates, phosphates, carbonate species (HCO_3^- , CO_3^{2-}), or dissolved organic matter, in contrast to pH-alkalinity-based estimates, which may introduce errors of 10-30%. Conversion of the primary signal (CO_2 volume fraction in the gas phase, % vol.) to dissolved concentration ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) is performed in two steps. First, the partial pressure of CO_2 in the measurement chamber is determined under membrane equilibrium conditions. Second, the corresponding dissolved concentration ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) is calculated using Henry's law. The temperature dependence of the Henry constant is described using a fourth-order polynomial approximation following the Sontheimer method (Yong-An and He-Ru, 2011), which is suitable for natural waters in the 0-30°C range. Real-time temperature data from the co-located YSI EXO2s sonde are used in these calculations. The final mass concentration is obtained by converting molar concentration using the molar mass of CO_2 ($44.01 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$).

Compared with electrochemical sensors (e.g., Severinghaus-type), the AMT sensor provides higher long-term stability (drift $< 1\% \text{ yr}^{-1}$) and requires minimal maintenance. Its major limitation is response time, with T90 of ~ 10 min (depending on temperature and concentration gradients), which constrains the detection of rapid fluctuations. However, the sensor is well suited for resolving diurnal and seasonal variability. In the present configuration, the sensor is polled for 30 s within each 4-min measurement cycle. Given the short initial warm-up time (< 12 s) and the relatively smooth temporal gradients observed at the study site, this sampling scheme provides stable and reliable measurements.

Prior to deployment, all sensors were calibrated according to the manufacturers' protocols. Technical and preventive maintenance of the measuring complex was performed on a monthly basis. The maintenance procedure included visual inspection of the submerged part, cleaning of the protective housing and measuring probes from external fouling, and a rapid check of sensor status. Owing to the continuous standard operation of the central motorized wiper of the EXO2s sonde, which was activated before each measurement cycle, the optical windows and electrode surfaces maintained stable cleanliness.

To verify the reliability of the obtained data, parallel hydrochemical water samples were collected

during each maintenance visit. The results of laboratory testing of the EXO2s sonde immediately after the completion of the deployment period (October 2025) also confirmed the absence of instrumental drift. Control measurements revealed that residual changes in readings for all studied parameters were not detected and remained within the declared instrumental accuracy of the device. A detailed quantitative analysis of the calibration relationships between field and laboratory data will be presented in another study.

Software and hardware architecture for data acquisition and processing. The data acquisition, transmission, storage, and visualization system of the ABS follows a three-tier architecture comprising an onboard controller, a data reception server, and a storage and visualization backend (Fig. 3).

Onboard controller and data transmission. An MSP430F449 microcontroller (Texas Instruments, USA) manages the measurement cycle. To minimize energy consumption, the system employs duty-cycled operation, alternating between an active sensing/transmission phase and a low-power sleep mode. Data are transmitted every four minutes via a SIM7600X 4G/LTE module as structured binary packets. Each packet includes a 20-byte header with a CRC16 checksum for integrity and a payload comprising device status, GPS coordinates, and 35-40 raw sensor values.

Server-side processing. A multithreaded Python TCP server on a cloud platform handles data reception. The server verifies packet integrity, decodes headers, and converts raw data into physical units. CH_4 concentrations are derived using the METS sensor's two-factor model, while carbon dioxide is calculated using Henry's law with temperature correction. Processed data are archived in structured text logs and daily rotated CSV files for fault tolerance and auditing.

Data storage and management. Long-term storage and time-series analysis are implemented using a PostgreSQL 14 database with the TimescaleDB extension. TimescaleDB facilitates automatic time-based partitioning and historical data compression ($5\text{-}10\times$). Data ingestion is performed every 10 min via a Python-based ETL pipeline, which validates data types and handles missing values before inserting records using the COPY method. The accumulated structured data are passed to the application level, where they are used in parallel in the Grafana interactive visualization module (with an alerting system), in the time-series statistical analysis subsystem, and for comprehensive synchronization of buoy data with the results of complementary field observations.

2.4. Methods of data processing and analysis

Statistical processing was performed in Statistica 14 (TIBCO Software). Descriptive statistics (mean, median, standard deviation, minimum, and maximum) were calculated for the entire observational dataset. Correlation analysis was performed using the Pearson correlation coefficient. The significance level was set at $\alpha=0.01$; correlations were considered statisti-

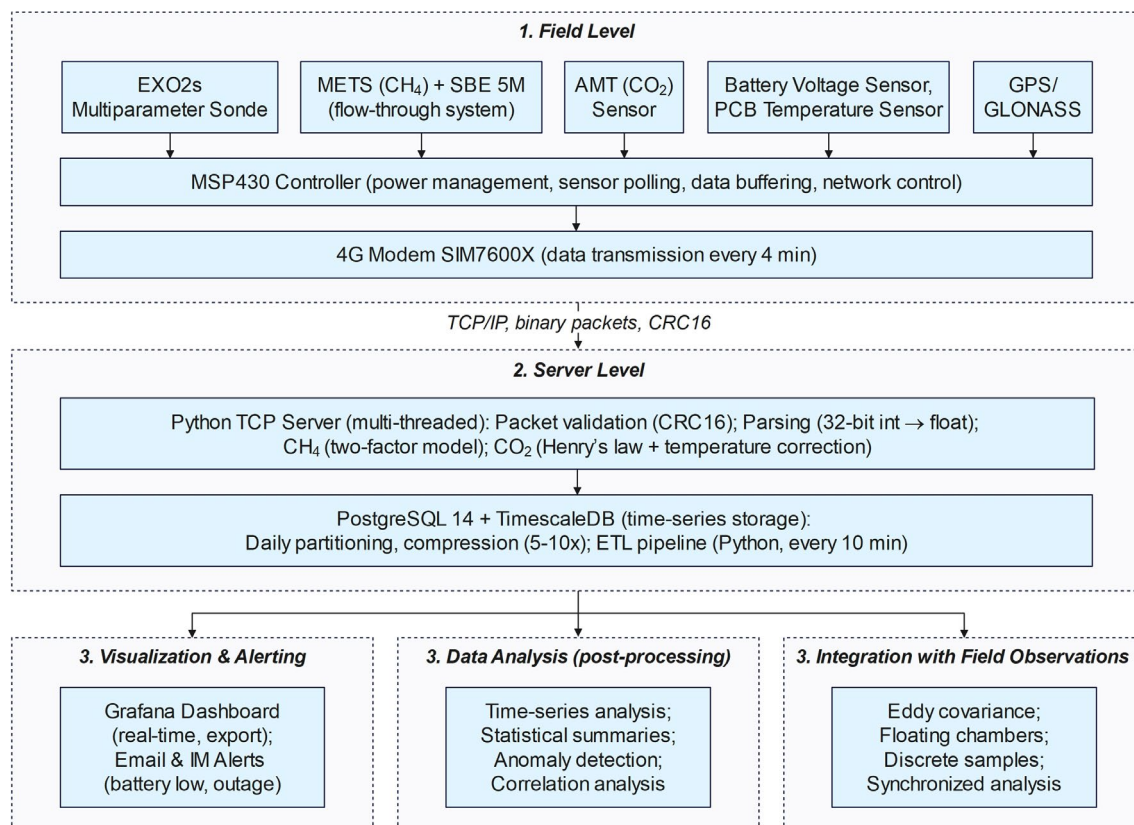


Fig. 3. Architecture of the ABS data acquisition, processing, and visualization system.

cally significant at $p < \alpha$. Sentinel-2 satellite imagery was analyzed using the COSMOCOMPOSIT software (Certificate of State Registration of Computer Program No. 2023685316). Cartographic visualization was performed in QGIS 3.40.15 (WGS-84 coordinate system).

3. Results and discussion

3.1. Data volume statistics

During deployment, 34,725 valid records were collected (totaling 4.24 MB in binary format) after accounting for communication gaps and periodic maintenance operations. This demonstrates efficient binary data transmission and storage within the system architecture. Such a data volume corresponds to 105 days of continuous, near-real-time monitoring, demonstrating the operational reliability of the system over the entire open-water season. Conversion to CSV increased the volume to 54.9 MB due to text formatting and metadata. Storage in TimescaleDB occupies ~22 MB, demonstrating a 2.5-fold reduction relative to CSV through efficient binary storage and compression.

3.2. Visualization and alerting (Grafana)

Interactive data analysis and real-time monitoring are implemented using Grafana (Grafana Labs). The platform is connected to the PostgreSQL/TimescaleDB database, providing high-performance time-series queries with typical response times below 1 s.

Custom dashboards (Fig. 4) support multi-panel visualization of all measured parameters on a common time axis with configurable intervals (e.g., hourly, daily, weekly, and monthly). Interactive features

include zooming and synchronized navigation across panels. The system also supports real-time derived metrics. Statistical panels display current values, daily averages, and extrema over selected periods. The dashboards revealed pronounced diurnal variability in dissolved oxygen, CO_2 and pH, as well as episodic peaks in CH_4 concentrations, which are difficult to capture with discrete sampling methods. These observations provide the first high-frequency dataset for this site and form the basis for further integrated analysis with EC and FC measurements.

An integrated alerting system allows threshold-based notifications via messaging services and email (e.g., rapid pH decrease, elevated CH_4 concentrations, DO depletion, or system malfunction). Data export is supported in CSV, JSON, and PNG formats for further analysis in external environments (Python, R, MATLAB, and Statistica). The platform is accessible via a web interface (HTTP/HTTPS) from both desktop and mobile devices, enabling near-real-time remote monitoring.

3.3. General characteristics of the hydrochemical and gas regime

The statistical characteristics of the main parameters recorded over the entire observation period are presented in Table 2.

Physicochemical conditions. The water temperature regime showed a typical seasonal pattern for mid-latitude reservoirs: maximum values (27.4°C) occurred at the end of July–beginning of August, followed by a gradual decline to 7.7°C by the end of October (monthly mean values decreased from 23.9°C in July to 10.4°C

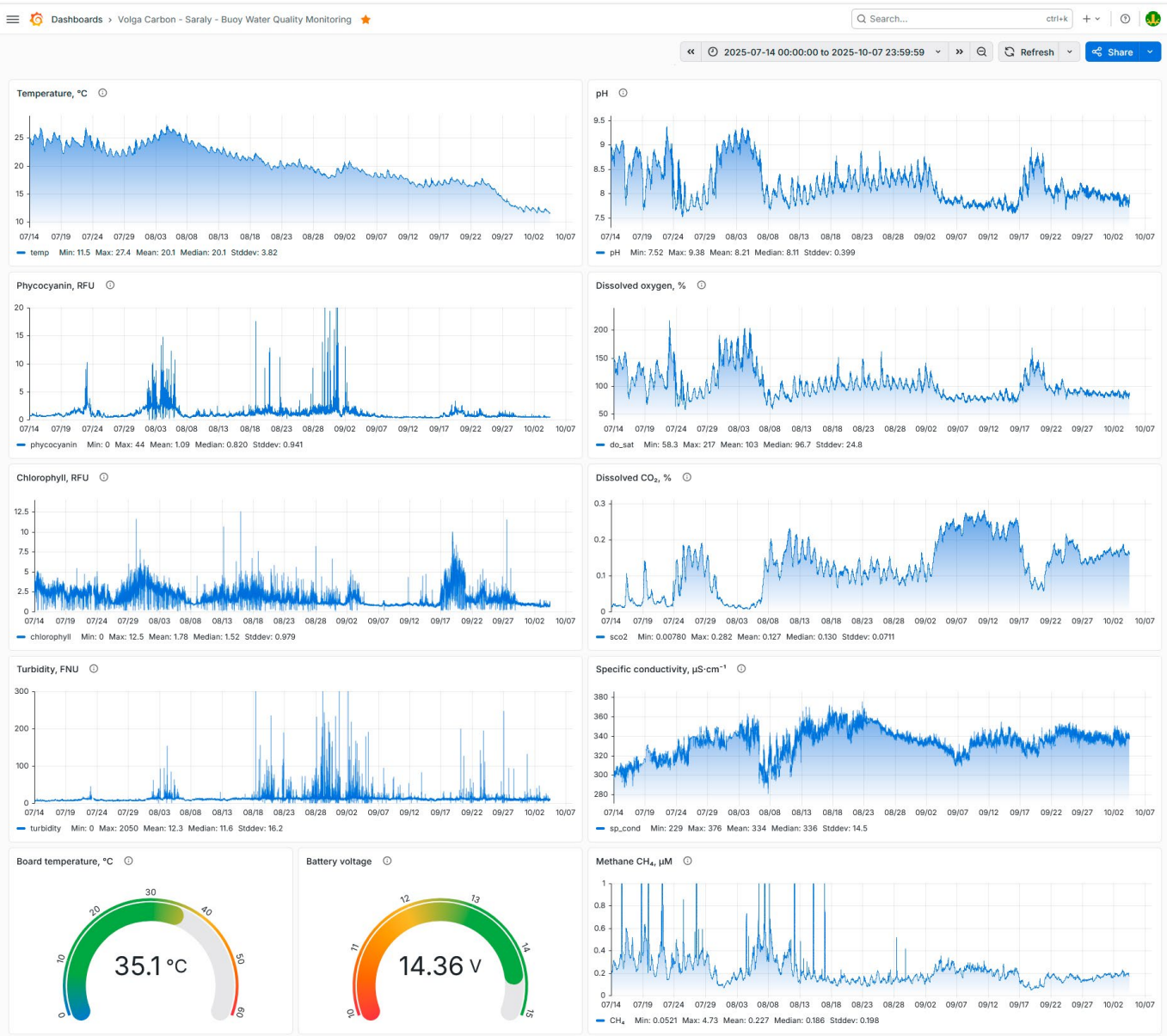


Fig. 4. Grafana web dashboard interface for monitoring ABS parameters.

Table 2. Statistical characteristics of the parameters recorded by the ABS (July-October 2025, n= 34,725).

Parameter	Units	Mean	Median	Minimum	Maximum	SD
Water temperature	°C	18.21	18.75	7.70	27.37	5.26
pH	pH units	8.18	8.08	7.52	9.38	0.37
Specific conductivity (SC)	µS·cm ⁻¹	334.53	336.41	281.00	375.71	13.66
Dissolved oxygen (DO)	mg·L ⁻¹	9.51	9.33	4.96	17.32	1.79
DO, saturation	%	101.07	94.77	58.30	216.84	23.02
Chlorophyll- <i>a</i>	RFU	1.55	1.24	0.00	12.45	0.95
Chlorophyll- <i>a</i>	µg·L ⁻¹	6.23	4.99	0.00	50.10	3.82
Phycocyanin	RFU, µg·L ⁻¹	0.77	0.49	0.00	43.77	0.89
Turbidity*	FNU	12.16	10.95	0.00	503.30	9.93
Dissolved CH ₄	µmol·L ⁻¹	0.212	0.173	0.052	4.726	0.182
Dissolved CO ₂	mg·L ⁻¹	2.40	2.43	0.11	5.19	1.28

Note: Two artifact turbidity values (956.7 and 2048.8 FNU) were excluded from the original dataset, as they exceeded neighboring values by orders of magnitude and were not confirmed by a synchronous response in other parameters.

in October). The diel amplitude of water temperature was small and consistently decreased from summer to autumn (from $\sim 1.5^{\circ}\text{C}$ in July to $\sim 0.4^{\circ}\text{C}$ in October), reflecting the high heat capacity of the water mass and the weakening of radiative heating toward the end of the season.

The pH values ranged from 7.52 to 9.38 (mean 8.18 ± 0.37), with maxima during the summer months (July–August, mean 8.36 ± 0.41). The diel dynamics of pH were synchronous with those of dissolved oxygen: minima occurred in the pre-dawn hours and maxima in the second half of the day. In contrast, CO_2 dynamics were in antiphase with pH and DO, reflecting a unified diel cycle of photosynthesis and respiration. The diel amplitude of pH consistently decreased from summer to autumn (from 0.44 units in July to 0.09 units in October).

Specific conductivity varied from 281.0 to 375.7 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (mean $334.5 \pm 13.7 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). During the summer low-water period, an overall upward trend was observed (from $\sim 300 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ in mid-July to $\sim 355 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ in the second half of August), against which episodes of sharp, short-term declines in values (up to $40 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ within a day) stood out. Comparison with meteorological data showed that these episodes largely coincided with periods of heavy rainfall over the watershed, causing short-term dilution of surface water masses by low-mineralized runoff. Furthermore, since the study site is located in the zone of interaction between the Volga and Kama water masses, it cannot be ruled out that such SC fluctuations were partly caused by shifts in the reservoir's hydrodynamic regime: increased discharge of softer Volga water through the Cheboksary hydroelectric dam may temporarily shift the mixing zone and displace more mineralized Kama water.

Turbidity mostly remained at a low level (mean 12.2 FNU and median 10.9 FNU), with 99.5% of values not exceeding 100 FNU. Against this background, episodic increases up to 503 FNU were recorded during the summer–autumn period. Joint analysis of parameter dynamics and meteorological conditions allowed us to distinguish two genetic types of turbidity peaks: biogenic (summer) and abiogenic (autumn). The origin of the summer maxima (July–August) is revealed by correlation and temporal trend analysis: during this period, turbidity peaks were synchronous with maximum phycocyanin concentrations (Fig. 5), showing a statistically significant, though moderate, positive correlation with it (Pearson correlation coefficient $r = 0.14$; hereinafter $p < 0.01$), while no significant correlation was found with chlorophyll-*a* ($r = -0.06$). This indicates a predominantly biogenic origin of the summer extremes, driven by the development of colonial cyanobacterial forms that form large aggregates during bloom periods, whereas the smaller cells of green algae had virtually no effect on overall turbidity. In contrast, the most pronounced autumn turbidity rises (with peaks on 12–13 and 20–22 October) were of terrigenous, abiogenic origin. During these periods phycocyanin concentration was at a minimum level; however, according to meteorological archive data, wind speeds increased to 6–10 m/s (with gusts up to 14 m/s) on

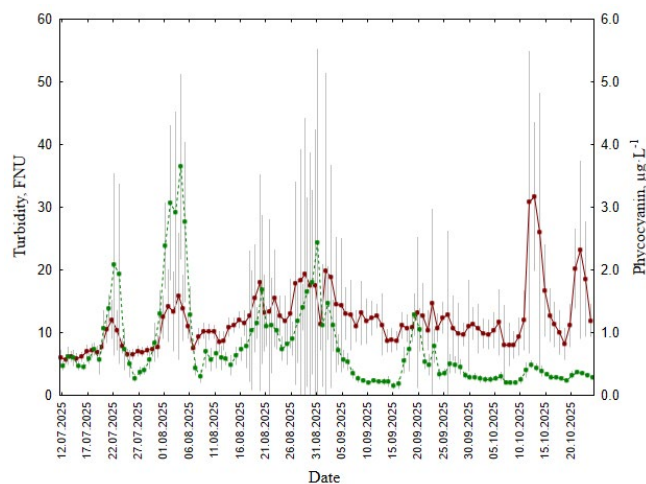


Fig. 5. Seasonal dynamics of turbidity (solid red line, FNU) and phycocyanin (dashed green line, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) over the observation period; mean $\pm$ standard deviation.

12–13 October and to 4–5 m/s (with gusts up to 11–12 m/s) on 20–21 October. In both cases, the wind was from the southeast and east, i.e., blowing from the open Volga-Kama reach—an extensive water area providing maximum fetch for wave development. This storm forcing caused intense hydrodynamic mixing of the water column and resuspension of mineral material over substantial areas of the adjacent shallows (predominant depths 2–4 m), which is independently confirmed by analysis of Sentinel-2 satellite imagery for this period.

Seasonal and diel dynamics of oxygen and phytoplankton. The oxygen regime reflected the balance between photosynthesis and the decomposition of organic matter. The mean water oxygen saturation over the entire period was 101.1%, although the range of variation was extremely wide (58.3–216.8%). There was a clear seasonal trend: from maximum production in July (mean saturation 116.0%) to a minimum in October (90.8%), attributable to declining solar radiation and water temperature toward the end of the growing season. Analysis of the data revealed a stable diel pattern. The nighttime DO minimum, associated with plankton community respiration and the oxidation of labile organic matter, occurred at 04:00–06:00. During July and August, nighttime minima remained at high levels (98.8% and 97.1%, respectively), whereas the most pronounced decline in nighttime saturation was recorded in September (86.1%) and October (88.7%), indicating an intensification of decomposition processes. The daytime DO maximum, driven by photosynthesis, was consistently recorded during daylight hours (13:00–19:00), gradually declining from summer to autumn (up to 131.1% in July; up to 122.3% in August; up to 97.9% in September; up to 93.7% in October). The diel amplitude also consistently decreased ($\sim 32\%$ in July; $\sim 5\%$ in October), reflecting the seasonal decline in the community's biological activity. Phytoplankton parameters (chlorophyll-*a* and phycocyanin) support this pattern and show a pronounced seasonal trend. At the peak of the growing season, mean chlorophyll-*a* concentrations were $9.26 \pm 3.58 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ in July and $6.77 \pm 2.98 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ in August, in good agreement with literature data for meso-eutrophic sections of the Kuibyshev Reservoir

during summer (Mineeva et al., 2022, 2025). The bulk of chlorophyll-*a* measurements during these months (77% of records) fell within the background range of up to $10 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, with 22.6% in the $10\text{--}20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ range; values above $20 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ accounted for $<0.5\%$ of the total dataset. Episodic increases up to $46\text{--}50 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ reflect short-term phytoplankton bloom events. By the end of the observation period, phytoplankton productivity consistently declined: mean chlorophyll-*a* concentrations fell to $5.79 \pm 4.38 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ in September and $3.63 \pm 1.63 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ in October, reflecting the seasonal decline of vegetative processes. Peak phycocyanin values reached $12.85 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ in July and $43.77 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ in August, indicating cyanobacterial dominance in late summer. Regular quantitative phycocyanin measurements are rarely conducted at reservoirs of the Volga cascade, underscoring the novelty and additional value of the high-frequency data series obtained here.

Validation of optical sensor data (artifact assessment). Because optical and fluorometric sensor readings (turbidity, chlorophyll-*a*, and phycocyanin) are potentially susceptible to artifacts (air bubbles and brief obstruction of the optical path), the resulting high-frequency series were additionally checked for anomalous values. Except for the two aforementioned single turbidity outliers (956.7 and 2048.8 FNU), which were excluded from the analysis, the distribution pattern of the remaining data supports their natural (biogenic and hydrodynamic), rather than instrumental, origin:

1. Distribution shape. A continuous, right-skewed distribution without isolated gaps in the tail of the data structure characterizes all three parameters. The proportion of turbidity values exceeding 100 FNU is only 0.5% and decreases smoothly up to the maximum of 503.3 FNU; a similarly smooth decline in frequency at extreme values is characteristic of chlorophyll-*a* and phycocyanin. Such a structure is typical of stochastic natural processes and atypical of random electronic malfunctions, which usually produce sharply isolated, order-of-magnitude outliers.
2. Consistency with independent biogeochemical patterns. Peak chlorophyll-*a* and phycocyanin values consistently occur during daylight hours—the period of maximum insolation and intense photosynthesis—which is physically implausible for random mechanical fouling of the sensor's optical window. Statistically significant correlations confirm this: chlorophyll-*a* and phycocyanin concentrations are correlated with each other, with pH, and with water oxygen saturation, and show a consistent inverse relationship with dissolved CO_2 . In other words, surges in optical indicators are synchronous with the physicochemical response expected from ecosystem production processes.
3. Seasonal and hydrometeorological determinism. Phycocyanin and chlorophyll-*a* maxima are confined to July–August—the period most favorable for cyanobacterial development in reservoirs of the Middle Volga. In turn, either bloom peaks (during summer) or storm-driven resuspension events

from the open reach (during autumn) determine the recorded turbidity extremes, as shown above, which meteorological and satellite data independently confirm.

Thus, except for two confirmed instrumental turbidity artifacts, the recorded fluctuations in optical parameters reflect real hydrobiological and hydrological processes and can be used for further analysis.

Dynamics of dissolved greenhouse gases. Dissolved CH_4 concentration varied over a wide range—from 0.052 to $4.726 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (median $0.173 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$). The atmospheric equilibrium concentration ($C_{\text{eq}} \approx 2.7 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$, calculated using Henry's law at an atmospheric CH_4 mole fraction of $\sim 1.9 \text{ ppm}$ (Nikitin et al., 2026a) and a Henry's constant $K_{\text{H}} \approx 1.4 \times 10^{-3} \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{atm}^{-1}$ (Sander, 2023)) is over two orders of magnitude lower than the observed values, resulting in supersaturation of the surface water layer by a factor of 55–110 (based on median monthly values) and indicating that the reservoir at the study site acts as a source of methane to the atmosphere throughout the entire ice-free period.

The greatest variability and the highest peak CH_4 values were recorded during the summer, after which concentrations stabilized at $0.15\text{--}0.18 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ in September–October. Frequency distribution analysis demonstrated that episodes with concentrations exceeding $500 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ —conditionally associated with short-term ebullitive degassing events rather than background diffusion—accounted for 2.70% of records overall for the observation period. Their seasonal distribution, however, was highly uneven: in July, the proportion of such episodes reached 8.03%; in August, 4.18%, whereas in September and October no values exceeding $500 \text{ nmol}\cdot\text{L}^{-1}$ were recorded. This association of extremes with the warm period is consistent with the well-known dependence of ebullitive CH_4 emission intensity on temperature and is characteristic of shallow eutrophic reservoirs. Further support comes from the correlation between episodes of elevated CH_4 and periods of reduced water oxygen saturation ($r = -0.32$) and elevated water temperature ($r = 0.31$), characteristic of enhanced methanogenesis in the bottom layer, followed by degassing.

The estimated frequency of ebullition events (5.6% of records during July–August) is in good agreement with the results of independent floating chamber measurements conducted at the same site during the summer–autumn period of 2024 (Nikitin et al., 2026b). Of the 22 chamber measurements at the open shallow-water station, one anomalously high flux value ($271.6 \text{ mg } \text{CH}_4\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$) was attributed to an ebullition event, corresponding to 4.5%—the same order of magnitude as the estimate based on ABS data. It should be noted that the chamber-based estimate relies on a limited sample ($n = 22$) and therefore has a wide confidence interval. Nevertheless, the agreement in orders of magnitude may serve as additional indirect evidence for the reality of the identified events and is consistent with the notion that episodic bubble-mediated transport is a persistent characteristic of the study site.

Dissolved CO_2 ranged from 0.11 to $5.19 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, exhibiting a pronounced seasonal pattern opposite to

that of CH_4 : minimum concentrations (median 0.59 mg-L^{-1}) were recorded in July—during the period of maximum photosynthetic activity (net autotrophy regime driven by active CO_2 uptake), whereas by September the median rose to 3.53 mg-L^{-1} , indicating a shift of the balance toward net heterotrophy as photosynthesis weakened, and organic matter decomposition intensified. The diel antiphase dynamics of DO and CO_2 are most clearly manifested during the summer (Fig. 6). The nighttime minimum of dissolved oxygen concentration (on average $\sim 8.5 \text{ mg-L}^{-1}$) coincides in time with the pre-dawn maximum of CO_2 ($\sim 1.81 \text{ mg-L}^{-1}$)—at 05:00-06:00. During daytime hours, there is the opposite pattern: by 17:00-18:00, DO concentration reaches its diel maximum ($\sim 10.7 \text{ mg-L}^{-1}$), while CO_2 content falls to its minimum values ($\sim 1.17 \text{ mg-L}^{-1}$). A similar pattern of diel CO_2 and DO dynamics, driven by the coupled cycles of photosynthesis and organic matter decomposition, was previously described for the littoral zone of the southern basin of Lake Baikal during the hydrological summer (Domysheva et al., 2013), confirming the universality of this mechanism for freshwater ecosystems.

Correlation analysis. To assess the internal consistency of the data and identify key biogeochemical relationships, a correlation analysis of the entire observational dataset was performed. The relationships identified are systematic in nature and fully consistent with the current understanding of eutrophic waterbody functioning.

Chlorophyll-*a* and phycocyanin concentrations are positively correlated with pH ($r = 0.63$ and $r = 0.61$) and water oxygen saturation ($r = 0.66$ and $r = 0.60$), and show an inverse relationship with dissolved CO_2 content ($r = -0.62$ and $r = -0.51$). This reflects the coupling of parameters within a single production cycle: during daylight hours, intense photosynthetic CO_2 uptake by the plankton community shifts the carbonate equilibrium toward higher pH and is accompanied by a synchronous increase in pigment concentration and oxygen saturation. The negative correlation with CO_2 confirms that during periods of peak vegetation, the reservoir's surface layer acts as a sink rather than a source of carbon dioxide to the atmosphere (Nikitin et al., 2025a).

Chlorophyll-*a* and phycocyanin are moderately positively correlated with each other ($r = 0.36$), indicating the coupled development of different phytoplankton groups, including associated cyanobacterial communities. Both parameters are, as expected, correlated with water temperature ($r = 0.48$ for chlorophyll-*a* and $r = 0.40$ for phycocyanin), reflecting the seasonal course of the growing season with peak productivity during the warmest summer months (July-August).

The strongest statistical relationships were found within the triad of hydrochemical parameters: pH, oxygen saturation (DO_{sat}), and dissolved CO_2 (pH vs DO_{sat} : $r = 0.96$; pH vs CO_2 : $r = -0.87$; DO_{sat} vs CO_2 : $r = -0.80$). Such high coefficients are consistent with the coupled effects of photosynthesis, respiration, and carbonate-system dynamics, and indicate a high internal consistency among the simultaneously measured variables.

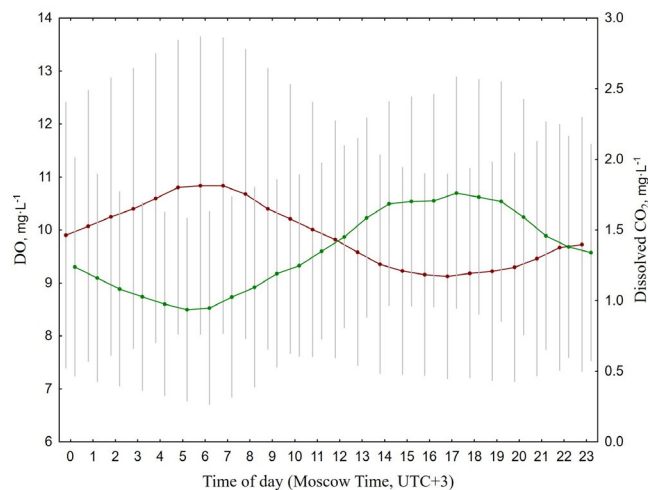


Fig. 6. Diel dynamics of dissolved oxygen (DO, green line) and dissolved CO_2 (red line) during the summer months (July-August 2025); mean $\pm$ standard deviation.

It should be noted that the high-frequency observation series exhibit temporal autocorrelation, and the large sample size ($n = 34,725$) renders even very weak associations formally significant. Therefore, the correlation coefficients are interpreted primarily as measures of the direction and strength of the relationships between parameters rather than as a rigorous test of statistical significance.

Overall, the main measured parameters (temperature, dissolved oxygen, pH, conductivity, and turbidity), most commonly used in reservoir monitoring, exhibit consistent seasonal and diel dynamics, in agreement with long-term data for the Kuibyshev Reservoir (Kuibyshev..., 2008; Latypova et al., 2023). The obtained chlorophyll-*a* series, in terms of value range and seasonal pattern, are consistent with the results of long-term phytoplankton observations at the studied waterbody (Mineeva et al., 2022, 2025). The structure of the correlation relationships indicates a high internal consistency of the dataset and its agreement with known biogeochemical patterns. Analysis of optical indicators for artifacts, based on evaluating distribution shape and the coupling of extremes with independent hydrochemical indicators (pH, DO, and CO_2), showed that the recorded peaks in chlorophyll-*a*, phycocyanin, and turbidity (except for the two excluded single outliers) are attributable to real natural processes (cyanobacterial vegetation and wind-driven resuspension). This confirms that the data obtained by the autonomous buoy station during its trial operation adequately reflect the hydrochemical and hydrobiological conditions. The high-frequency series generated can serve as a reliable basis for further, more detailed analysis of the seasonal and diel variability of the reservoir's gas and bioproduction regimes, which is to be presented in a separate publication.

3.4. Integration with the eddy covariance system and data exchange

Synchronization of ABS data with the EC system, which measures 30-min fluxes of CH_4 and CO_2 , is based on a common UTC time scale. The 4-min ABS records

are aggregated to half-hour intervals corresponding to the EC averaging periods (e.g., 00:00-00:30 and 00:30-01:00). Aggregation is performed using either the median (to reduce the influence of outliers) or the mean.

For joint analysis, a unified dataset is constructed in PostgreSQL/TimescaleDB (as a materialized view or a merged table) at a 30-minute resolution. This dataset integrates aggregated ABS parameters (hydrochemical and gas variables) with EC fluxes (CH_4 and CO_2) and meteorological variables from the weather station (air temperature, humidity, wind speed and direction, atmospheric pressure, and solar radiation). EC fluxes are expressed in $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}(\text{30 min})^{-1}$ for CH_4 and $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}(\text{30 min})^{-1}$ for CO_2 . For reporting and comparison with other studies, these values were converted to hourly and daily totals (e.g., expressed in $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$ and $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\text{d}^{-1}$ for CH_4 , respectively) or averages, as appropriate, during post-processing.

The resulting dataset is exported in CSV format for further statistical analysis, including time lag assessment, correlation analysis, and parameterization of gas exchange models. Time lag estimation between variations in dissolved GHG concentration (ABS data) and subsequent changes in CH_4 and CO_2 fluxes (EC data) is performed by maximizing the cross-correlation function (CCF) for time shifts ranging from 0 to 120 min. This approach is common for quantifying temporal offsets in environmental time series (Vitale et al., 2024).

3.5. Integration with other observation methods at the carbon supersite

The ABS represents an important component of the integrated GHG monitoring system at the aquatic site of the Volga Carbon Supersite (Fig. 7). In addition to the ABS, four complementary observation systems operate at the site: an EC system installed on a station-

ary pontoon (Nikitin et al., 2025a); FC for discrete GHG flux measurements (Nikitin et al., 2026b); and remote sensing platforms, including the Apache 4 Pro (CHC Navigation, China)—a multi-purpose hydrographic USV equipped with a dual-frequency echosounder, a GNSS receiver, and a Y4000 online multiparameter water quality sensor (Yosemitech, China) for bathymetric surveys and spatial water quality mapping; UAV and satellite observations (Sentinel and Landsat constellations) for assessing spatial variability across the reservoir (Gafurov et al., 2024; Khomyakov and Usmanov, 2025; Nikitin et al., 2024a, 2024b). Integration of these approaches enables validation, calibration, scaling, and cross-verification tasks that cannot be achieved using any single method alone.

Integration of ABS and EC observations enables analysis of relationships between dissolved gas concentrations (CH_4 and CO_2) in the surface water layer and their turbulent fluxes to the atmosphere. It also allows estimation of time lags between changes in dissolved gas concentrations (e.g., during degassing or photosynthesis) and corresponding flux responses, as well as calculation of gas exchange coefficients (k_{600}) using wind data and concentration gradients for empirical model evaluation.

Comparison of ABS observations with discrete FC measurements enables verification of the in situ GHG sensors through comparison of dissolved CH_4 and CO_2 concentrations with indirect flux estimates derived using a thin boundary layer (TBL) diffusion model. This approach also allows estimation of the ebullitive component of CH_4 emission: when chamber-derived fluxes substantially exceed calculated diffusive fluxes (based on METS data and wind-derived gas exchange coefficients), bubble-mediated transport can be inferred. Moreover, FC observations support the calibration of spatial emission models based on continuous point measurements from the ABS.



Fig. 7. Equipment complex at the Volga Carbon Supersite (aquatic site): 1—EC system on a stationary anchored pontoon; 2—ABS; 3—FC; 4—Apache USV.

Combined use of ABS observations with USV, UAV, and satellite data facilitates the development of regional bio-optical models through calibration of relationships between spectral characteristics and in situ concentrations of chlorophyll, phycocyanin, and suspended matter. These models will enable the assessment of phytoplankton biomass distribution across the entire reservoir, identification of links between bloom intensity and dissolved GHG concentrations, and upscaling of point observations to the reservoir scale.

4. Conclusions

An autonomous buoy station was successfully developed and operated at the Volga Carbon Supersite. To the best of our knowledge, for the first time in Russia, a YSI EXO2s multiparameter sonde was integrated with direct in situ CH₄ (METS) and CO₂ (AMT) sensors within a single ABS, enabling simultaneous high-frequency monitoring of hydrochemical parameters and dissolved GHG concentrations in near-real time. The implemented infrastructure—comprising 4G transmission, a Python-based server, PostgreSQL/TimescaleDB storage, and Grafana visualization—supports data synchronization at a four-minute resolution. During the July–October 2025 deployment, the system collected ~35,000 records, capturing diurnal and seasonal variability, including short-term CH₄ concentration peaks potentially associated with ebullition events. The proposed ABS architecture may serve as a reference design for regional GHG monitoring networks. Future research will prioritize partitioning CH₄ fluxes and validating basin-scale emission models to refine the regional carbon budget.

Acknowledgments

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

- Abril G., Richard S., Guérin F. 2006. In situ measurements of dissolved gases (CO₂ and CH₄) in a wide range of concentrations in a tropical reservoir using an equilibrator. *Science of the Total Environment* 354(2–3): 246–251. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2004.12.051](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.12.051)
- Aslamov I.A., Makarov M.M., Gnatovsky R.Yu. et al. 2020. Observation results of hydrophysical and hydrochemical parameters in the littoral zone of Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology* 5: 1073–1075. DOI: [10.31951/2658-3518-2020-a-5-1073](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-a-5-1073)
- Bastviken D., Johnson M.S. 2025. Future methane emissions from lakes and reservoirs. *Nature Water* 3(12): 1397–1410. DOI: [10.1038/s44221-025-00532-6](https://doi.org/10.1038/s44221-025-00532-6)
- 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)
- Błażejowski A., Pecolt S., Grunt M. et al. 2024. Multi-domain, autonomous measurement buoy as an element of the water quality monitoring and early warning system in rivers and water reservoirs. *Rocznik Ochrona Środowiska* 26: 18–29. DOI: [10.54740/ros.2024.002](https://doi.org/10.54740/ros.2024.002)
- Bodmer P., Bors C., Liu L. et al. 2025. Large sediment methane production potential in reservoirs compared to lakes and rivers. *Limnology and Oceanography* 70(6): 1561–1574. DOI: [10.1002/lno.70063](https://doi.org/10.1002/lno.70063)
- Boulart C., Connelly D.P., Mowlem M.C. 2010. Sensors and technologies for in situ dissolved methane measurements and their evaluation using Technology Readiness Levels. *TrAC Trends in Analytical Chemistry* 29(2): 186–195. DOI: [10.1016/j.trac.2009.12.001](https://doi.org/10.1016/j.trac.2009.12.001)
- Domysheva V.M., Sakirko M.V., Pestunov D.A. et al. 2013. Seasonal behavior of the CO₂ gas exchange process in the “atmosphere–water” system of littoral zone of Southern Baikal. 2. Hydrological summer. *Atmospheric and Oceanic Optics* 26(2): 163–169. DOI: [10.1134/s1024856013020085](https://doi.org/10.1134/s1024856013020085)
- Dziuban A.N. 2016. The methane cycle and their role in the destruction of organic matter in sediments of reservoirs of the Volga-Kama cascade. *Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod [Proceedings of the Institute of Inland Waters Biology]* 74 (77): 21–36. DOI: [10.24411/0320-3557-2016-10008](https://doi.org/10.24411/0320-3557-2016-10008) (in Russian)
- 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)
- Fedorov Yu.A., Garkusha D.N., Kosolapov A.E. et al. 2024. Artificial water bodies as methane genesis hotbeds (the Tsimlyansk Reservoir as an example). *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management* 3: 68–82. DOI: [10.35567/19994508-2024-3-68-72](https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-72) (in Russian)
- 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: 1047. DOI: [10.1051/bioconf/202412601047](https://doi.org/10.1051/bioconf/202412601047)
- 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)
- Khomyakov P.V., Usmanov B.M. 2025. Contemporary examination of the bathymetric characteristics of the Kuibyshev reservoir shallows. In: *Modern problems of reservoirs and their catchments*. Perm: Perm State National Research University, pp. 229–233. ISBN: 978-5-7944-4262-5. (in Russian)
- Korneva L.G., Solovyeva V.V., Makarova O.S. et al. 2025. Current state of phytoplankton in the Volga, Kama, Don, and Volga–Don Canal reservoirs (summer 2015–2018) under conditions of a changing climate and continuing eutrophy. *Inland Water Biology* 18(1): 26–44. DOI: [10.1134/S1995082925700026](https://doi.org/10.1134/S1995082925700026)
- Koschorreck M., Kamjunke N., Koedel U. et al. 2024. Diurnal versus spatial variability of greenhouse gas emissions from an anthropogenically modified lowland river in Germany. *Biogeosciences* 21(6): 1613–1628. DOI: [10.5194/bg-21-1613-2024](https://doi.org/10.5194/bg-21-1613-2024)
- Kuibyshev Reservoir (scientific information guide). 2008. In: Rozenberg G.S., Vykhristiuk L.A. Togliatti: IEVB RAS. (in Russian)
- Lami A., Rogora M., Austoni M. et al. 2025. High frequency data from in-situ sensors as a support to long-term ecological research on aquatic ecosystems. *ARPHA Conference Abstracts* 8: e151707. DOI: [10.3897/aca.8.e151707](https://doi.org/10.3897/aca.8.e151707)

- 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)
- Leng P., Rode M., Koschorreck M. 2025. Summer drought enhances diurnal amplitude of CO₂ in two German rivers of different size. *Water Research* 271: 122870. DOI: [10.1016/j.watres.2024.122870](https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122870)
- Liu S., Xue M., Cui X. et al. 2023. A review on the methane emission detection during offshore natural gas hydrate production. *Frontiers in Energy Research* 11: 1130810. DOI: [10.3389/fenrg.2023.1130810](https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1130810)
- Loken L.C., Crawford J.T., Schramm P.J. et al. 2019. Large spatial and temporal variability of carbon dioxide and methane in a eutrophic lake. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 124(7): 2248–2266. DOI: [10.1029/2019jg005186](https://doi.org/10.1029/2019jg005186)
- Makarov M., Aslamov I., Gnatovsky R. 2021. Environmental monitoring of the littoral zone of Lake Baikal using a network of automatic hydro-meteorological stations: development and trial run. *Sensors* 21(22): 7659. DOI: [10.3390/s21227659](https://doi.org/10.3390/s21227659)
- Marcé R., George G., Buscarinu P. et al. 2016. Automatic high frequency monitoring for improved lake and reservoir management. *Environmental Science & Technology* 50(20): 10780–10794. DOI: [10.1021/acs.est.6b01604](https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01604)
- Minakova E.A., Shlychkov A.P., Kondratyev S.A. et al. 2025. Quantification of diffuse nutrient load from agriculture on the catchments of the Kuibyshev and Nizhnekamsk storage reservoirs within the Republic of Tatarstan. *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences* 6: 57–69. DOI: [10.17076/lim2069](https://doi.org/10.17076/lim2069)
- Mineeva N.M., Semadeni I.V., Solovyeva V.V. et al. 2022. Chlorophyll content and the modern trophic state of the Volga River reservoirs (2019–2020). *Inland Water Biology* 15(4): 410–414. DOI: [10.1134/s1995082922040393](https://doi.org/10.1134/s1995082922040393)
- Mineeva N.M., Semadeni I.V., Makarova O.S. 2025. Plant pigments in water of the Volga River reservoirs: current status and trends in long-term changes. *Inland Water Biology* 18(1): 1–14. DOI: [10.1134/S1995082924600212](https://doi.org/10.1134/S1995082924600212)
- Nazarious M.I., Zorzano M.-P., Martin-Torres J. 2023. Sub-liquid and atmospheric measurement instrument to autonomously monitor the biochemistry of natural aquatic ecosystems. *ACS ES&T Water* 3(8): 2338–2354. DOI: [10.1021/acsestwater.3c00082](https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00082)
- 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., Stepanova N., Gubeeva S. et al. 2024a. 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., Kondratyeva T.A. et al. 2024b. Spatiotemporal dynamics of phytoplankton blooms in Kuibyshev Reservoir based on satellite remote sensing data. *Sovremennye Problemy Distsionnogo 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., Aukhadeev T.R. et al. 2025a. Greenhouse gas fluxes (CH₄, CO₂) from the Kuibyshev Reservoir: an eddy covariance study. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 995–1012. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-4-995](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-4-995)
- Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Kuzmin R.S. et al. 2025b. 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., Kuzmin R.S. et al. 2025c. Ploshchad melkovodiy Kuibyshevskogo vodokhranilishcha pri razlichnykh ekspluatatsionnykh urovnyakh [Shallow water area of the Kuibyshev Reservoir at different operational water levels]. In: *Home country ecology: problems and solutions*. Kirov: Vyatka State University, pp. 44–49. ISBN: 978-5-98228-289-7. (in Russian)
- Nikitin O.V., Stepanova N.Yu., Kuzmin R.S. et al. 2026a. Methane content in the atmosphere of the Republic of Tatarstan according to satellite monitoring data: global trends and regional features. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii* [Russian Journal of Applied Ecology] 1(45): 21–35. DOI: [10.24852/2411-7374.2026.1.21.35](https://doi.org/10.24852/2411-7374.2026.1.21.35) (in Russian)
- Nikitin O.V., Stepanova N.Y., Novikova L.V. et al. 2026b. Methane emissions from the shallow water zone of the Kuibyshev Reservoir: a floating chamber study. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management* 1: 76–93. DOI: [10.35567/1999-4508-2026-1-76-93](https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-76-93)
- Olchev A.V., Gulev S.K. 2024. Carbon flux measurement supersites of the Russian Federation: objectives, methodology, prospects. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 60(S3): S428–S434. DOI: [10.1134/S0001433824700841](https://doi.org/10.1134/S0001433824700841)
- Pestunov D.A., Panchenko M.V., Shmargunov V.P. 2008. A device for measuring the content of CO₂ dissolved in water. *Physical Instruments for Ecology, Medicine, and Biology* 51: 773–774. DOI: [10.1134/S0020441208050229](https://doi.org/10.1134/S0020441208050229)
- Pestunov D.A., Domysheva V.M., Shamrin A.M. et al. 2025. Carbon fluxes in the process of gas exchange of CO₂ and CH₄ in the atmosphere–aquatic system of the coastal zone of Lake Baikal. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 61(S1): S59–S65. DOI: [10.1134/S000143382570094X](https://doi.org/10.1134/S000143382570094X)
- Pozdnyakov Sh.R., Kondratyev S.A. 2022. Diffuse nutrient load is a possible cause of anthropogenic eutrophication of water bodies. *Rossiyskiy zhurnal prikladnoy ekologii* [Russian Journal of Applied Ecology] 4(32): 36–43. DOI: [10.24852/2411-7374.2022.4.36.43](https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.4.36.43) (in Russian)
- Rabaey J.S., Lewis A.S.L., Attermeyer K. et al. 2026. Depth-resolved carbon dioxide and methane concentrations in 522 lakes, ponds, and reservoirs worldwide. *Scientific Data* 13: 483. DOI: [10.1038/s41597-026-06751-0](https://doi.org/10.1038/s41597-026-06751-0)
- Reed D.E., Dugan H.A., Flannery A.L. et al. 2018. Carbon sink and source dynamics of a eutrophic deep lake using multiple flux observations over multiple years. *Limnology and Oceanography Letters* 3(3): 285–292. DOI: [10.1002/lol2.10075](https://doi.org/10.1002/lol2.10075)
- Rogora M., Cancellario T., Caroni R. et al. 2023. High-frequency monitoring through in-situ fluorometric sensors: a supporting tool to long-term ecological research on lakes. *Frontiers in Environmental Science* 10: 1058515. DOI: [10.3389/fenvs.2022.1058515](https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1058515)
- Sander R. 2023. Compilation of Henry’s law constants (version 5.0.0) for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics* 23(19): 10901–12440. DOI: [10.5194/acp-23-10901-2023](https://doi.org/10.5194/acp-23-10901-2023)
- Santos I.R., Hatje V., Serrano O. et al. 2022. Carbon sequestration in aquatic ecosystems: recent advances and challenges. *Limnology and Oceanography* 67(S2): S1–S5. DOI: [10.1002/lno.12268](https://doi.org/10.1002/lno.12268)
- Selezneva A.V., Beshpalova K.V., Seleznev V.A. 2018. The dissolved non-organic phosphorous content in the water of the Kuybyshev Reservoir. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management* 2: 35–45. DOI: [10.35567/1999-4508-2018-2-3](https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-2-3) (in Russian)

Song C., Liu S., Wang G. et al. 2024. Inland water greenhouse gas emissions offset the terrestrial carbon sink in the northern cryosphere. *Science Advances* 10(39): eadp0024. DOI: [10.1126/sciadv.adp0024](https://doi.org/10.1126/sciadv.adp0024)

Spank U., Bernhofer C., Mauder M. et al. 2023. Contrasting temporal dynamics of methane and carbon dioxide emissions from a eutrophic reservoir detected by eddy covariance measurements. *Meteorologische Zeitschrift* 32(4): 317–342. DOI: [10.1127/metz/2023/1162](https://doi.org/10.1127/metz/2023/1162)

Vitale D., Fratini G., Helfter C. et al. 2024. A pre-whitening with block-bootstrap cross-correlation procedure for temporal alignment of data sampled by eddy covariance systems. *Environmental and Ecological Statistics* 31(2): 219–244. DOI: [10.1007/s10651-024-00615-9](https://doi.org/10.1007/s10651-024-00615-9)

Voronich S.S., Roeva N.N., Khlopaev A.G. 2024. Organization of observations of natural water quality in the Moscow region. *Problemy regional'noy ekologii* [Regional Environmental Issues] 1: 81–84. DOI: [10.24412/1728-323X-2024-1-81-84](https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-1-81-84) (in Russian)

Wang W., Sun X., Zhu X. et al. 2026. Contribution of lakes to global greenhouse gas emissions: mechanisms,

quantification and mitigation strategies. *Journal of Environmental Management* 398: 128585. DOI: [10.1016/j.jenvman.2026.128585](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.128585)

Yong-An Z., He-Ru X. 2011. Online measurement solubility of CO₂ in water based on membrane covered optical sensor. *International Conference on Advanced Infocomm Technology* 2011: 30. DOI: [10.1049/cp.2011.1075](https://doi.org/10.1049/cp.2011.1075)

Yoon T.K., Jin H., Oh N.-H. et al. 2016. Technical note: Assessing gas equilibration systems for continuous pCO₂ measurements in inland waters. *Biogeosciences* 13(13): 3915–3930. DOI: [10.5194/bg-13-3915-2016](https://doi.org/10.5194/bg-13-3915-2016)

Zakharova O.V., Moskvina N.N., Glazkova A.V. et al. 2026. Carbon measurement supersites in Russia: using information technologies to track research trends (2014–2024). *Information Society* 1: 141–161. DOI: [10.52605/16059921_2026_01_141](https://doi.org/10.52605/16059921_2026_01_141)

Zhang H., Zhang Z., Zhao X. et al. 2026. Hydrodynamic control on the interannual variability of algal bloom in the Pearl River Estuary from 2021 to 2024: evidences from buoy data and hydrodynamic modeling. *Marine Pollution Bulletin* 226: 119320. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2026.119320](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.119320)

Автономная буйковая станция на карбоновом полигоне: интегрированный мониторинг пресноводной экосистемы и потоков парниковых газов

Оригинальная статья

LIMNOLOGY
FRESHWATER
BIOLOGYНикитин О.В.^{1*}, Кузьмин Р.С.¹, Потапов К.О.², Шевчук К.А.², Латыпова В.З.²¹ ООО «Экоаудит», пер. 4-й Очаковский, 3, Москва, 119361, Россия² Казанский федеральный университет, ул. Кремлевская, 18, 420008, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе представлен опыт развертывания автономной буйковой станции (АБС) для высокочастотного мониторинга параметров качества воды и растворенных парниковых газов (CH_4 и CO_2) в режиме реального времени на карбоновом полигоне «Карбон – Поволжье» (Куйбышевское водохранилище, Россия). Равнинные водохранилища являются значимыми источниками парниковых газов, однако оценка их вклада в региональные углеродные бюджеты часто ограничена из-за отсутствия непрерывных синхронизированных наблюдений. Насколько нам известно, впервые в России мультипараметрический зонд YSI EXO2s был интегрирован с прямыми погружными датчиками метана (METS) и диоксида углерода (AMT) на единой автономной платформе на базе буя Daowan. Разработанная программно-аппаратная архитектура включает передачу данных по сетям 4G, многопоточный TCP-сервер на Python и систему долговременного хранения на базе PostgreSQL с расширением TimescaleDB, обеспечивающую синхронизацию данных с 4-минутным разрешением. Интерактивный мониторинг и визуализация реализованы с использованием Grafana. За период эксплуатации с июля по октябрь 2025 г. система собрала около 35 тыс. записей, отражающих детальную суточную и сезонную динамику параметров. Результаты позволили выявить кратковременные пики концентраций растворенного метана, потенциально связанные с эпизодическими событиями пузырькового выноса, которые обычно пропускаются при дискретных измерениях. Интеграция АБС с системами турбулентных пульсаций и плавучими камерами создает основу для перекрестной верификации потоков и калибровки региональных биооптических и эмиссионных моделей. Предложенная архитектура АБС и технические решения могут служить основой для создания интегрированных сетей мониторинга парниковых газов на внутренних водоемах.

Ключевые слова: автономная буйковая станция, карбоновый полигон, CH_4 , CO_2 , парниковые газы, Куйбышевское водохранилище

Для цитирования: Никитин О.В., Кузьмин Р.С., Потапов К.О., Шевчук К.А., Латыпова В.З. Автономная буйковая станция на карбоновом полигоне: интегрированный мониторинг пресноводной экосистемы и потоков парниковых газов // Limnology and Freshwater Biology. 2026. — № 5. — С. 711–741. DOI: [10.31951/2658-3518-2026-A-5-711](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2026-A-5-711)

1. Введение

Водные экосистемы играют двойственную роль в глобальном углеродном цикле, выступая одновременно как сток органического вещества и как значимый источник парниковых газов (ПГ) (Beaulieu et al., 2020; Santos et al., 2022; Song et al., 2024; Wang et al., 2026). Равнинные водохранилища особенно подвержены повышенным эмиссиям из-за мелководности, высокого трофического статуса и регулируемого гидрологического режима (Федоров

и др., 2024; Bastviken and Johnson, 2025; Bodmer et al., 2025; Rabaey et al., 2026).

Куйбышевское водохранилище – крупнейшее в Волжско-Камском каскаде и одно из крупнейших в мире – представляет собой потенциально значимый источник метана (CH_4) и диоксида углерода (CO_2). Однако количественные оценки его вклада в региональный углеродный бюджет остаются ограниченными из-за недостатка непрерывных наблюдений. Хотя исследования с использованием плавучих камер (ПК), метода турбулентных пульсаций

*Автор для переписки. Адрес e-mail: olnova@mail.ru (О.В. Никитин)

Поступила: 02 июля 2026;

Принята после доработки: 28 сентября 2026;

Опубликована online: 29 октября 2026

© Автор(ы) 2026. Эта работа распространяется под международной лицензией Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0.



(ТП) и моделирования (Гречушникова и др., 2023; Никитин и др., 2025a; Nikitin et al., 2025; Nikitin et al., 2026) подтвердили существенные эмиссии, каждый из методов имеет свои ограничения (Erkkilä et al., 2018). Плавающие камеры дают точные точечные измерения, но не обладают достаточным временным разрешением для регистрации эпизодических событий, таких как пузырьковый вынос метана при ветровом перемешивании или перепадах давления, а также ограничены в пространственном охвате, что затрудняет оценку репрезентативности участка. Метод турбулентных пульсаций, напротив, обеспечивает непрерывные измерения интегральных потоков, но не позволяет непосредственно измерять концентрации растворенных газов в водной толще. Моделирование дает интегральные оценки, но опирается на параметризацию, требующие верификации с помощью высокочастотных натурных данных, особенно в части пузырькового переноса. Это создает критический пробел в данных, затрудняющий установление причинно-следственных связей между биогеохимическими процессами (например, метаногенезом, фотосинтезом, дыханием) и наблюдаемыми эмиссиями в атмосферу. Решение этой проблемы требует синхронизированных высокочастотных измерений растворенных CH_4 и CO_2 в связке с ключевыми факторами среды (Lami et al., 2025; Nazarious et al., 2023; Spank et al., 2023; Yoon et al., 2016).

С 2021 года в России развивается национальная сеть карбоновых полигонов, предназначенных для совершенствования технологий мониторинга углеродного баланса и верификации данных о потоках ПГ (Olchev and Gulev, 2024; Zakharova et al., 2026). Карбоновый полигон «Карбон – Поволжье» (Республика Татарстан) представляет собой редкий пример интегрированного мониторинга наземных и водных экосистем (Никитин и др., 2022). В этом контексте Куйбышевское водохранилище рассматривается не просто как транзитный путь, а как активный биогеохимический реактор, влияющий на региональный углеродный бюджет.

Хотя автономные буйковые станции (АБС) широко используются для стандартного мониторинга качества воды (температура, pH, хлорофилл и др.) (Воронич и др., 2024; Aslamov et al., 2020; Błażejowski et al., 2024; Makarov et al., 2021; Marcé et al., 2016; Rogora et al., 2023; Zhang et al., 2026), измерения растворенных ПГ остаются заметно менее распространенными. Традиционно они выполняются с использованием газо-водных эквивалентаторов, которые предотвращают прямой контакт с водой, но накладывают дополнительные требования к энергообеспечению и обслуживанию (Abril et al., 2006; Pestunov et al., 2008, 2025; Yoon et al., 2016). Такие системы, хотя и надежны, менее приспособлены для длительной автономной эксплуатации из-за механической сложности и высокого энергопотребления.

Альтернативой являются прямые (in situ) измерения с использованием полупроводниковых (METS) или оптических (NDIR) сенсоров (Boulart et al., 2010; Leng et al., 2025; Liu et al., 2023). Это

упрощает конструкцию за счет размещения датчиков непосредственно в воде, но создает такие проблемы, как биообрастание, температурная зависимость и высокое энергопотребление нагреваемых или активных чувствительных элементов. Интеграция многопараметрических зондов с датчиками CH_4 и CO_2 на единой автономной платформе остается по-прежнему технически сложной задачей. В литературе описано лишь ограниченное число подобных систем (Koschorreck et al., 2024; Loken et al., 2019; Reed et al., 2018; Spank et al., 2023), сочетающих широкий набор гидрохимических параметров с возможностью долговременного мониторинга; при этом они часто основаны на иных принципах детектирования или ограничены короткими сроками эксплуатации. На сегодняшний день ни одна подобная система не была описана для Куйбышевского водохранилища или других водных объектов Поволжья.

Для преодоления этих ограничений была развернута АБС на полигоне «Карбон – Поволжье». В данной статье описаны её архитектура и эксплуатационные характеристики с акцентом на интеграцию сенсоров EXO2s, METS и AMT, систему управления данными (многопоточный сервер на Python, PostgreSQL с расширением TimescaleDB и Grafana), а также методы синхронизации данных АБС с измерениями ТП и ПК для совместного анализа.

Новизна работы заключается в: (1) первой в России интеграции высокочастотного многопараметрического зонда YSI EXO2s с прямыми in situ датчиками растворенных CH_4 (METS) и CO_2 (AMT) на единой автономной буйковой платформе; (2) разработке программно-аппаратной платформы для сбора и визуализации данных в реальном времени; и (3) реализации алгоритмов синхронизации данных (с дискретностью 4 мин), специально разработанных для прямого сопоставления с наблюдениями ТП. Предложенная архитектура АБС может служить основой для региональных сетей мониторинга ПГ на внутренних водоемах.

2. Материалы и методы

2.1. Район исследований

Куйбышевское водохранилище (53°20'–56°10' с.ш., 47°30'–51°30' в.д.) – крупный эвтрофный водоем в европейской части России, образованный плотиной Жигулевской ГЭС. Его площадь составляет 5900 км², объем – 57,3 км³, средняя глубина – 9,7 м (Куйбышевское..., 2008). Водохранилище характеризуется обширными мелководьями и высокой биологической продуктивностью, что способствует интенсивной деструкции органического вещества и активным эмиссиям ПГ (Гречушникова и др., 2023; Дзюбан, 2016; Никитин и др., 2024, 2025a, 2025b; Nikitin et al., 2025, 2026).

АБС была развернута и эксплуатировалась в Куйбышевском водохранилище на территории карбонового полигона «Карбон – Поволжье» (55°16'09,7" с.ш., 49°16'48,7" в.д.; Рис. 1) с 12 июля по 24 октября 2025 г. Полигон расположен в пределах Саралинского участка Волжско-Камского

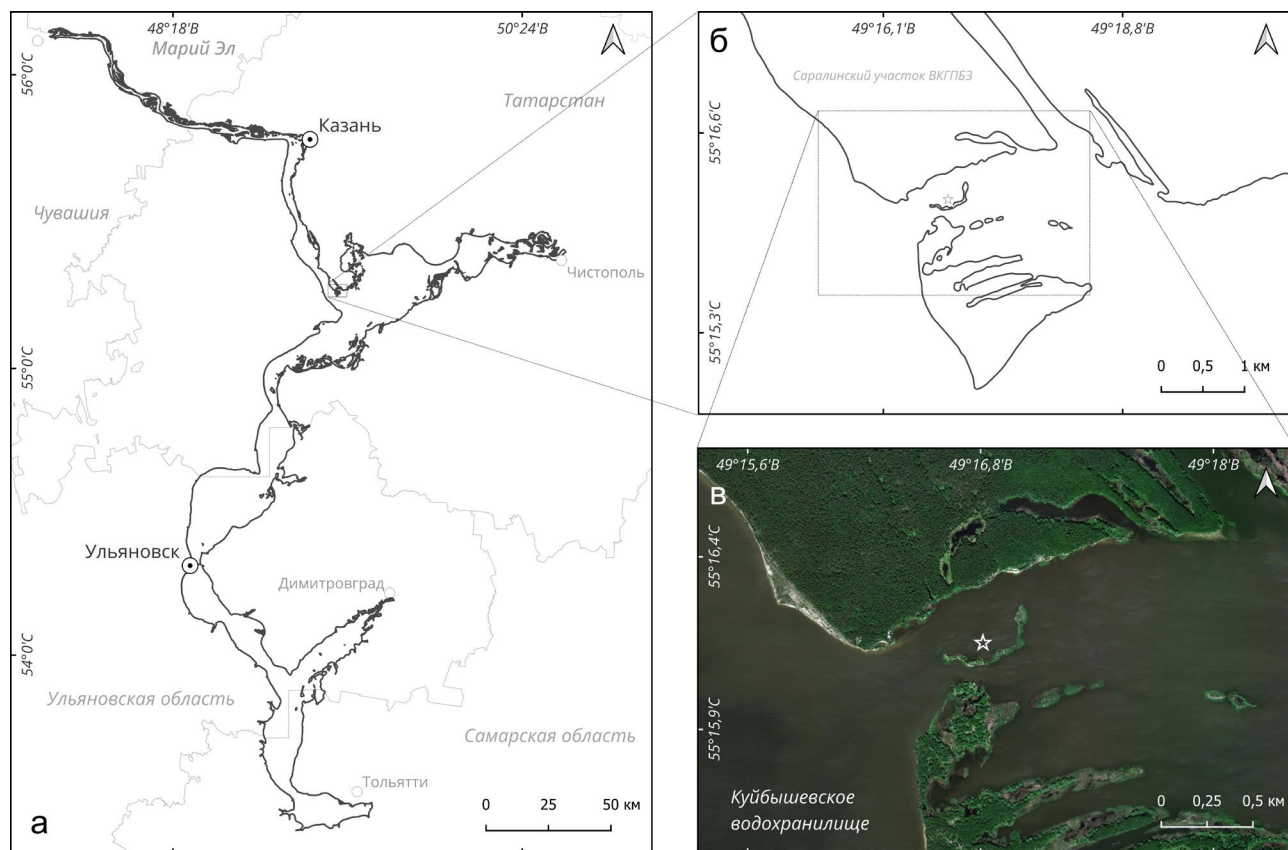


Рис. 1. Район исследований: (а) расположение Куйбышевского водохранилища; (б) карбоновый полигон «Карбон – Поволжье» (Саралы); (в) точка установки АБС (★).

государственного природного биосферного заповедника (охраняемая территория международного значения ЮНЕСКО), который занимает полуостров, выступающий на 4–5 км в Волго-Камский плёс водохранилища. Участок характеризуется удаленностью от антропогенных источников и испытывает минимальное воздействие благодаря режиму заповедника, включая ограничение судоходства. Предшествующие исследования показали, что гидрохимические условия участка репрезентативны для открытой акватории водохранилища и могут рассматриваться как фоновые (Никитин и др., 2022; Латыпова и др., 2023).

Акватория представляет собой открытое мелководье с глубинами от 2 до 4 м в зависимости от уровня воды. Донные отложения состоят преимущественно из песка и илистого песка с примесью детрита. Содержание органического вещества, оцененное по потерям при прокаливании, составляет от 1,0 до 9,6 % (медиана 1,4 %), что типично для открытых участков водохранилища. Крупные заросли макрофитов отсутствуют (Nikitin et al., 2026). Эвтрофный статус водохранилища в сочетании с высоким поступлением биогенов с водосбора (Минакова и др., 2025; Поздняков и Кондратьев, 2022; Селезнева и др., 2018; Korneva et al., 2025; Mineeva et al., 2022, 2025) способствует интенсивной деструкции органического вещества, что, в свою очередь, обуславливает активную продукцию ПГ в донных отложениях и последующую дегазацию (Дзюбан, 2016; Никитин и др., 2025a). Акватория подвержена активному ветроволновому перемешиванию; однако в штиль может развиваться термическая стратификация с формированием термоклина

на глубинах 2–3 м. Такие условия способствуют образованию локальных придонных гипоксических или аноксических зон, стимулирующих метаногенез в осадках (Nikitin et al., 2026).

Выбор участка для развертывания АБС обусловлен тремя факторами. Во-первых, расположение в границах карбонового полигона обеспечивает интеграцию с дополнительными методами наблюдений, включая измерения методами ТП и ПК (Nikitin et al., 2025, 2026), спутниковые наблюдения (Никитин и др., 2024; Nikitin et al., 2024) и съемки с беспилотных летательных и надводных аппаратов (Хомяков и Усманов, 2025; Gafurov et al., 2024). Во-вторых, участок репрезентативен для мелководной зоны водохранилища, что позволяет экстраполировать результаты на аналогичные акватории. В-третьих, наличие многолетнего ряда данных о качестве воды (2018–2025 гг.) создает основу для анализа межгодовой изменчивости.

2.2. Конструкция АБС и система энергоснабжения

АБС создана на базе платформы Daowan (Qingdao Daowan Technology Co., Ltd., Китай), адаптированной для установки на внутренних водоемах с нерегулярным волнением. Модульная конструкция с болтовыми соединениями обеспечивает удобство транспортировки, поскольку платформа может быть разобрана на 5–6 секций, помещающихся в легковой автомобиль. Это позволяет производить сборку и сезонное обслуживание силами 2–3 специалистов без привлечения спецтехники и грузоподъемного оборудования.

Основные конструктивные элементы АБС показаны на Рис. 2:

1. Пластиковый плавучий корпус (поз. 4) – торoidalной формы, диаметром 60 см, изготовлен из формованного пластика. В центральной полости размещен герметичный отсек для аккумулятора из нержавеющей стали.
2. Металлическая защитная рама (поз. 5) – сварная конструкция из двух колец из нержавеющей стали, соединенных вертикальными стойками. Защищает корпус и верхнее оборудование от механических повреждений (например, плавающего мусора или навала судов).
3. Цилиндрический защитный кожух датчиков (поз. 6) – диаметром 38 см и высотой 80 см, изготовлен из перфорированного листа нержавеющей стали с диаметром отверстий 10 мм и шагом перфорации 15 мм, нижнее основание кожуха выполнено открытым. Такая конфигурация обеспечивает коэффициент живого сечения стенок около 35 % и свободный сквозной водообмен между внутренней частью кожуха и окружающей средой, предотвращая возникновение застойных явлений. Кожух защищает сенсоры от крупного мусора, механического воздействия сильных течений и биообрастания, а также служит монтажной основой для измерительных датчиков.
4. Верхняя платформа – треугольная конструкция из нержавеющей стали (объединенная с аккумуляторным отсеком), служащая опорой для трех солнечных панелей (поз. 3), проблескового маяка (поз. 1) и основного модуля управления и передачи данных (поз. 2).
5. Проблесковый маяк GS-LS/C – светодиодный, дальность видимости до 3 км в темное время суток, обеспечивает навигационную безопасность в условиях ограниченной видимости.
6. Измерительные сенсоры (поз. 7–9) установлены на фиксированной глубине ~0,5 м от поверхности. Это положение остается стабильным независимо от колебаний уровня воды благодаря жесткому креплению датчиков к корпусу. Выбор глубины обусловлен необходимостью измерений в верхнем оптически активном слое, репрезентативном для спутникового зондирования и наиболее чувствительном к суточной динамике фотосинтеза и газообмена между водой и атмосферой.

Подводные компоненты (аккумуляторный отсек и защитный кожух датчиков), а также верхняя платформа и несущие элементы выполнены из нержавеющей стали для обеспечения коррозионной стойкости при длительной эксплуатации. АБС закреплена цепью к стационарно заякоренной плавучей платформе (понтон 6 × 4 м), что ограничивает её перемещение радиусом около 1 м. При необходимости возможна также независимая якорная стоянка буя.



Рис. 2. Схема АБС: 1 – маяк; 2 – модуль управления и передачи данных; 3 – солнечные панели; 4 – плавучий корпус; 5 – защитная рама; 6 – защитный кожух датчиков; 7 – зонд EXO2s; 8 – датчик METS (с насосом SBE 5M); 9 – датчик АМТ.

Для обеспечения бесперебойной автономной работы реализована фотоэлектрическая система постоянного тока, включающая массив солнечных панелей, контроллер заряда и аккумуляторную батарею. Электроэнергию генерируют три панели AK Solar (Ningbo Aike Electronic Technology Co., Ltd.) мощностью 20 Вт каждая (суммарная установленная мощность 60 Вт). Панели соединены параллельно через встроенные блокирующие диоды, предотвращающие обратные токи от освещённых панелей к затенённым, и ориентированы по разным азимутам. Такое расположение оптимизирует улавливание рассеянной радиации, обеспечивает стабильную генерацию при частичном затенении и продлевает эффективную работу в утренние и вечерние часы, что особенно важно для поддержания энергетического баланса в осенний период при снижении инсоляции.

Накопление энергии обеспечивает герметичный гелевый свинцово-кислотный аккумулятор 12 В, 40 А·ч. Гелевый электролит выбран за высокую устойчивость к глубоким циклическим разрядам, стабильную работу при качке и отсутствие необходимости обслуживания. Регулирование параметров заряда осуществляется стандартным ШИМ-контроллером (PWM) с номинальным током 10 А (12/24 В, макс. 130 Вт при 12 В), реализующим защиту от перезаряда и глубокого разряда. Благодаря азимутальной ориентации панелей и их ограниченной суммарной мощности (60 Вт), фактический пиковый ток заряда не превышает расчётного значения ($I_{\max} = 60 \text{ Вт} / 14 \text{ В} \approx 4,3 \text{ А}$), что соответствует щадящему режиму для гелевого аккумулятора ёмкостью 40 А·ч (при рекомендуемом диапазоне 4–8 А).

Измерительный комплекс работает в циклическом режиме: активная фаза (работа насоса, опрос датчиков, передача данных) чередуется с фазой пониженного энергопотребления. Средневзвешенная потребляемая мощность составляет около 2,5 Вт, что соответствует суточной потребности ~60 Вт·ч. В условиях инсоляции региона (май–октябрь) расчётная среднесуточная выработка солнечных панелей составляет 170–190 Вт·ч, что примерно в 3 раза превышает потребление. Это гарантирует полный заряд аккумулятора даже в пасмурные дни. Полезный резерв аккумулятора (при 50 % глубине разряда) составляет около 240 Вт·ч (12 В × 40 А·ч × 0,5), обеспечивая непрерывную работу до 96 часов (4 суток) без солнечной подзарядки. За четыре месяца эксплуатации (июль–октябрь 2025 г.) напряжение аккумулятора, регистрировавшееся буюм в каждом пакете данных, ни разу не опускалось ниже 12,11 В, а средние значения составили от 13,64 В (в июле) до 13,03 В (в октябре), что подтверждает корректную работу системы без перезаряда и глубоких разрядов.

2.3. Приборное оснащение и измерительные каналы

Основные измерительные каналы АБС и их технические характеристики приведены в Таблице 1.

Мультипараметрический зонд YSI EXO2s (Xylem, США). В системе используется YSI EXO2s – компактный, внешне запитываемый зонд, разработанный для интеграции с автономными буюми. Зонд имеет семь универсальных портов, шесть из которых используются для цифровых датчиков, а один – для центральной моторизованной щетки. Для защиты от биообрастания щетка совершает возвратно-вращательное движение в каждом цикле пробуждения, обеспечивая надежность данных при длительном развертывании. Зонд EXO2s измеряет температуру, электропроводность, pH, ОВП, растворенный кислород, хлорофилл, фикоцианин, мутность и давление. Хлорофилл-а и фикоцианин преимущественно регистрируются в относительных единицах флуоресценции (ОЕФ), поскольку этот формат обеспечивает большую стабильность и меньше зависит от изменений видового состава фитопланктона по сравнению с расчетными массовыми концентрациями (мкг·л⁻¹). На основе этих измерений автоматически рассчитываются удельная электропроводность (25 °C), соленость и плотность воды. Общее содержание растворенных веществ (TDS) и взвешенных веществ (TSS) рассчитываются после завершения полевых работ с использованием локальных линейных регрессий по гравиметрическим данным.

Датчик растворенного метана METS (Franatech GmbH, Германия). METS – широко используемый прибор для измерений CH₄ в водной среде (Boulart

Таблица 1. Спецификация сенсоров АБС.

Параметр	Прибор	Метод	Единицы	Диапазон	Точность	Разрешение
Температура воды	EXO2s	Термистор	°C	0–50	± 0,2 °C	0,001 °C
Электропроводность	EXO2s	4-электродный графитовый	мСм·см ⁻¹	0–100	± 1% или 2 мкСм·см ⁻¹	0,001–0,01
pH	EXO2s	Стеклянный электрод	ед. pH	0–14	± 0,1	0,01
ОВП	EXO2s	Платиновый электрод	мВ	–999... + 999	± 20 мВ	0,1 мВ
Растворенный кислород	EXO2s	Оптический (люминесценция)	мг·л ⁻¹ ; % нас.	0–50 мг·л ⁻¹ ; 0–500 %	± 0,1 мг·л ⁻¹ или ± 1%	0,01 мг·л ⁻¹ ; 0,1%
Хлорофилл-а	EXO2s	Флуориметрия (470 нм)	мкг·л ⁻¹ ; ОЕФ	0–400 мкг·л ⁻¹ ; 0–100 ОЕФ	Линейность r ² > 0,999*	0,01 ОЕФ
Фикоцианин	EXO2s	Флуориметрия (590 нм)	мкг·л ⁻¹ ; ОЕФ	0–100 мкг·л ⁻¹ ; 0–100 ОЕФ	Линейность r ² > 0,999*	0,01 ОЕФ
Мутность	EXO2s	Нефелометрия (860 нм, 90°)	ЕМФ	0–4000	± 0,3 ЕМФ или ± 2%	0,01–0,1
Давление (глубина)	EXO2s	Тензодатчик	бар, м	0–10	± 0,004 м	0,001 м
Растворенный CH ₄	METS	Полупроводник (SnO ₂)	мкмоль·л ⁻¹	0,001–10	± 2%	0,1 нмоль·л ⁻¹
Растворенный CO ₂	AMT	Оптический (NDIR)	% об.; мг·л ⁻¹	0–5	± 0,06 мг·л ⁻¹	0,01 мг·л ⁻¹
GPS-позиция	Встроенный GPS	Спутниковая навигация	град.	–	± 5 м	–
Напряжение батареи	Контроллер платформы	Аналоговый вход	В	0–15	± 0,1 В	0,01 В

Примечания: Составлено авторами по технической документации оборудования; * – для флуориметрических каналов (хлорофилл-а и фикоцианин) в графе «Точность» указана линейность калибровочной характеристики по родамину WT (r² > 0,999), гарантирующая воспроизводимость сигнала прибора.

et al., 2010; Liu et al., 2023). Являясь ключевым компонентом АБС, он обеспечивает прямое определение концентраций растворенного CH_4 вместо косвенных методов. Принцип работы датчика основан на сочетании мембранной экстракции и полупроводникового детектирования. Растворенный CH_4 диффундирует из воды через полупроницаемую силиконовую мембрану в герметичную измерительную камеру. Мембрана свободно пропускает CH_4 , но эффективно блокирует воду и растворенные ионы. Внутри камеры чувствительный элемент из диоксида олова (SnO_2) – полупроводник n-типа – нагрет до $\sim 400^\circ\text{C}$ с помощью встроенного микронагревателя. Адсорбция CH_4 на поверхности сенсора инициирует окислительно-восстановительную реакцию с хемосорбированными формами кислорода: $\text{CH}_4 + 4\text{O}^-(\text{ads}) \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$. Высвободившиеся электроны увеличивают концентрацию носителей заряда в приповерхностном слое, что приводит к уменьшению электрического сопротивления. Изменение сопротивления пропорционально парциальному давлению CH_4 в камере и, следовательно, его концентрации в воде.

Для стабильности измерений и снижения чувствительности к гидродинамическим условиям (например, скорости течения и турбулентности) датчик интегрирован в проточную систему с принудительной циркуляцией на базе миниатюрного погружного насоса SBE 5M (модель 05M.2220, Sea-Bird Scientific, США). Такая конфигурация обеспечивает постоянную скорость водообмена у мембраны, минимизируя запаздывание отклика и позволяя детектировать низкие концентрации CH_4 , которые при пассивной диффузии оставались бы ниже порога обнаружения.

Чувствительный элемент SnO_2 и силиконовая мембрана имеют сильную температурную зависимость, поэтому концентрация не может быть получена только на основе закона Генри. Датчик снабжен внутренним прецизионным термистором, а концентрации CH_4 рассчитываются с использованием двухфакторной калибровочной модели производителя с индивидуальными коэффициентами. Это обеспечивает автоматическую температурную компенсацию в диапазоне $2\text{--}25^\circ\text{C}$ и точность $\pm 2\%$ от измеряемой величины.

В отличие от других датчиков АБС, METS работает непрерывно в течение всего периода развертывания. Это необходимо для поддержания рабочей температуры элемента SnO_2 . После включения датчику требуется прогрев в течение 10–30 мин (в зависимости от температуры окружающей среды), в течение которого измерения нестабильны и непригодны для анализа. Периодическое включение-выключение приводило бы к существенной потере данных. Непрерывная работа – это осознанный компромисс между энергоэффективностью и качеством данных.

Энергопотребление датчика составляет около 1,44 Вт (120 мА при 12 В постоянного тока), что составляет более 50% суточной потребности станции (~ 60 Вт·ч). Эта постоянная нагрузка была учтена при проектировании фотоэлектрической

системы и аккумуляторной батареи для обеспечения надежной долговременной работы.

Датчик растворенного диоксида углерода АМТ (Analysenmesstechnik GmbH, Германия). Концентрация растворенного CO_2 измерялась специализированным оптическим анализатором АМТ, предназначенным для прямого определения парциального давления CO_2 в водных средах (Leng et al., 2025). Измерительная камера отделена от окружающей воды газопроницаемой силиконовой мембраной, которая пропускает молекулы газа, но задерживает воду и взвешенные частицы. После установления равновесия парциальных давлений (обычно ~ 10 мин) концентрация CO_2 определяется с помощью однолучевого двухволнового NDIR-сенсора. Двухволновая схема включает внутренний референсный канал, что обеспечивает высокую стабильность за счет компенсации дрейфа источника и оптических помех.

Датчик оптимизирован для автономной работы при низких температурах. Для предотвращения конденсации на оптических элементах головка сенсора снабжена встроенным нагревателем. Температурная компенсация выполняется автоматически. Низкое энергопотребление ($< 0,4$ Вт) и малое время прогрева (< 2 мин) позволяют использовать датчик в циклическом режиме, синхронизированном с другими измерительными каналами.

Измерительный принцип высокоселективен и не подвержен влиянию растворенных силикатов, фосфатов, карбонатных ионов (HCO_3^- , CO_3^{2-}) или растворенного органического вещества – в отличие от оценок по pH-щелочности, которые могут давать ошибку 10–30 %. Пересчет первичного сигнала (объемная доля CO_2 в газовой фазе, % об.) в концентрацию в воде ($\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$) выполняется в два этапа. Сначала определяется парциальное давление CO_2 в измерительной камере. Затем соответствующая равновесная концентрация ($\text{ммоль}\cdot\text{л}^{-1}$) рассчитывается по закону Генри. Температурная зависимость константы Генри описывается полиномом четвертой степени по методу Сонтхаймера (Yong-An and He-Ru, 2011), пригодному для природных вод в диапазоне $0\text{--}30^\circ\text{C}$. Для расчетов используются данные о температуре от синхронно работающего зонда EXO2s. Итоговая массовая концентрация получается пересчетом молярной концентрации через молярную массу CO_2 ($44,01$ г·моль $^{-1}$).

По сравнению с электрохимическими датчиками (например, типа Зеверенгауза), АМТ обеспечивает более высокую долговременную стабильность (дрейф $< 1\%$ в год) и требует минимального обслуживания. Основное ограничение – время отклика (T_{90} около 10 мин, в зависимости от температуры и концентрационных градиентов), что ограничивает детектирование быстрых флуктуаций. Однако датчик хорошо подходит для регистрации суточной и сезонной изменчивости. В данной конфигурации датчик опрашивается по 30 с в каждом 4-минутном цикле. Учитывая малое начальное время прогрева (< 12 с) и относительно плавные временные градиенты на участке исследований, такая схема опроса обеспечивает стабильные и надежные измерения.

Перед развертыванием все датчики были откалиброваны по протоколам производителей. Техническое и профилактическое обслуживание измерительного комплекса выполнялось с ежемесячной периодичностью. Регламент включал визуальный осмотр погружной части, очистку защитного кожуха и измерительных зондов от внешнего обрастания и экспресс-проверку состояния датчиков. Благодаря непрерывной штатной работе центральной моторизованной щетки зонда EXO2s, активировавшейся перед каждым циклом измерений, оптические окна и поверхности электродов сохраняли стабильную чистоту.

Для контроля достоверности получаемых данных в процессе каждого обслуживания производился отбор параллельных гидрохимических проб воды. Отсутствие приборного дрейфа также подтвердили результаты лабораторного тестирования зонда EXO2s, проведенного непосредственно после завершения периода эксплуатации (октябрь 2025 г.). Контрольные измерения показали, что остаточные изменения показаний по всем исследуемым параметрам не зафиксированы и находятся в пределах заявленной паспортной погрешности прибора. Подробный количественный анализ калибровочных связей между натурными и лабораторными данными будет представлен в отдельной работе.

Программно-аппаратная архитектура сбора и обработки данных. Система сбора, передачи, хранения и визуализации данных АБС выполнена по трехуровневой архитектуре, включающей бортовой контроллер, сервер приема данных и систему хранения с визуализацией (Рис. 3).

Бортовой контроллер и передача данных. Измерительным циклом управляет микроконтрол-

лер MSP430F449 (Texas Instruments, США). Для минимизации энергопотребления система работает в циклическом режиме, чередуя активную фазу (измерения и передача) с режимом пониженного энергопотребления. Данные передаются каждые 4 минуты через 4G/LTE-модуль SIM7600X в виде структурированных бинарных пакетов. Каждый пакет включает 20-байтовый заголовок с контрольной суммой CRC16 для проверки целостности и полезную нагрузку, содержащую статус устройства, GPS-координаты и 35–40 сырых значений с датчиков.

Обработка на сервере. Многопоточный TCP-сервер на Python, развернутый на облачной платформе, принимает данные, проверяет целостность пакетов, декодирует заголовки и преобразует сырые данные в физические величины. Концентрации CH_4 рассчитываются по двухфакторной модели датчика METS, а CO_2 – по закону Генри с температурной коррекцией. Обработанные данные архивируются в структурированных текстовых логах и ежедневно ротируются в CSV-файлах для отказоустойчивости и аудита.

Хранение и управление данными. Долговременное хранение и анализ временных рядов реализованы с использованием PostgreSQL 14 с расширением TimescaleDB. TimescaleDB обеспечивает автоматическое партиционирование по времени и сжатие исторических данных (в 5–10 раз). Загрузка данных выполняется каждые 10 минут с помощью ETL-конвейера на Python, который проверяет типы данных и обрабатывает пропуски перед вставкой записей методом COPY. Накопленные структурированные данные поступают на прикладной уровень, где параллельно используются

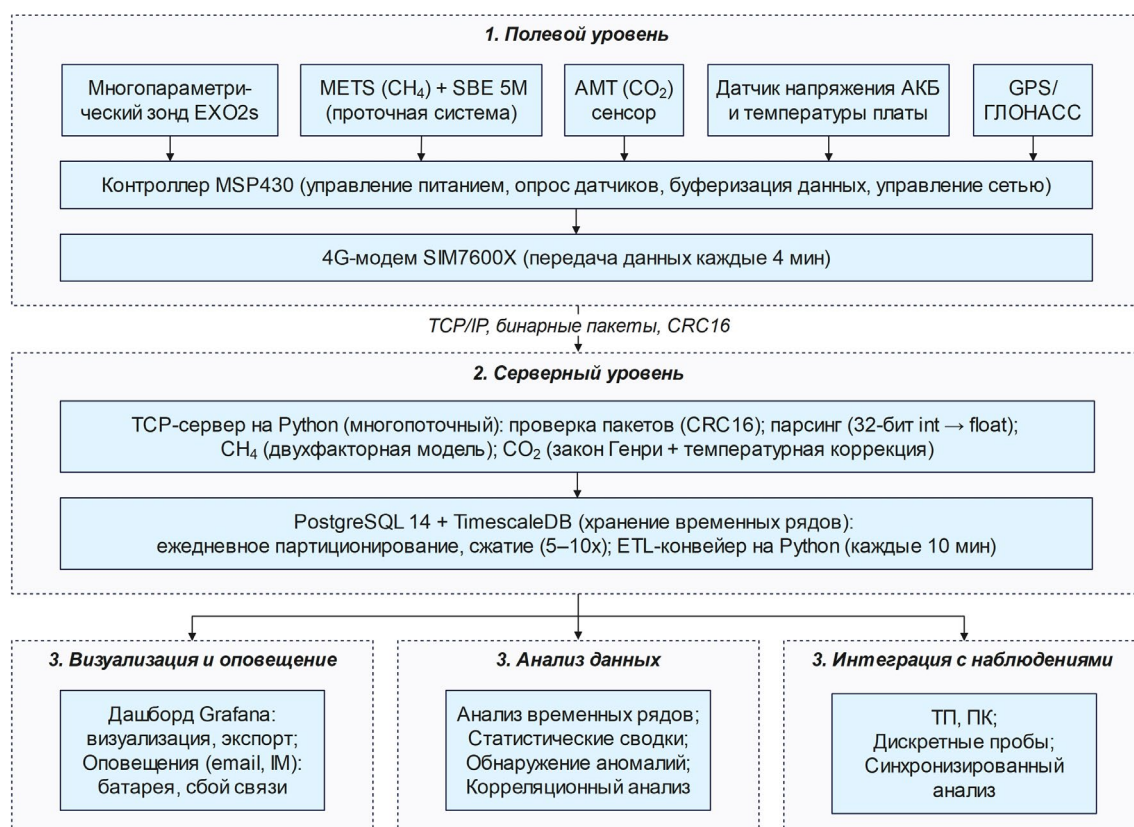


Рис. 3. Архитектура системы сбора, передачи, обработки и визуализации данных АБС.

в модуле интерактивной визуализации Grafana (с системой оповещений), подсистеме статистического анализа временных рядов, а также для комплексной синхронизации данных буя с результатами сопутствующих натурных наблюдений.

2.4. Методы обработки и анализа данных

Статистическая обработка данных выполнена в программе Statistica 14 (TIBCO Software). Для всего массива наблюдений рассчитывались описательные статистики (среднее, медиана, стандартное отклонение, минимум, максимум). Корреляционный анализ проводился с использованием коэффициента корреляции Пирсона. Принят уровень значимости $\alpha = 0,01$, связи считались статистически значимыми при $p < \alpha$. Анализ спутниковых снимков Sentinel-2 выполнялся с использованием программы COSMOCOMPOSIT (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023685316). Картографическая визуализация выполнена в QGIS 3.40.15 (система координат WGS-84).

3. Результаты и обсуждение

3.1. Статистика объема данных

За время развертывания собрано 34 725 валидных записей (всего 4,24 МБ в бинарном формате) с учетом пропусков связи и остановок на обслуживание, что свидетельствует об эффективности бинарной передачи и хранения данных в рамках архитектуры системы. Это соответствует 105 дням непрерывного мониторинга в режиме, близком к реальному времени, и подтверждает эксплуатационную надежность системы в течение всего периода открытой воды. При конвертации в CSV объем вырос до 54,9 МБ из-за текстового форматирования и метаданных. Хранение в TimescaleDB занимает около 22 МБ, что в 2,5 раза эффективнее CSV благодаря бинарному хранению и сжатию.

3.2. Визуализация и оповещение (Grafana)

Интерактивный анализ и мониторинг в реальном времени реализованы с использованием Grafana (Grafana Labs). Платформа подключена к базе данных PostgreSQL/TimescaleDB, обеспечивая высокопроизводительные запросы к временным рядам с типичным временем отклика менее 1 секунды.

Пользовательские дашборды (Рис. 4) поддерживают многопанельную визуализацию всех измеряемых параметров на общей временной шкале с настраиваемыми интервалами (почасовые, суточные, недельные, месячные). Интерактивные возможности включают масштабирование и синхронизированную навигацию по панелям. Система также поддерживает вычисляемые метрики в реальном времени. Статистические панели отображают текущие значения, среднесуточные показатели и

экстремумы за выбранный период. На дашбордах отчетливо прослеживается выраженная суточная изменчивость растворенного кислорода, CO_2 и pH, а также эпизодические пики концентраций CH_4 , которые трудно зафиксировать при дискретных измерениях. Эти наблюдения представляют собой первый высокочастотный набор данных для данного участка и служат основой для дальнейшего совместного анализа с измерениями ТП и ПК.

Встроенная система оповещения позволяет настраивать пороговые уведомления через мессенджеры и электронную почту (например, резкое снижение pH, повышение концентраций CH_4 , падение растворенного кислорода или сбой оборудования). Поддерживается экспорт данных в форматах CSV, JSON и PNG для дальнейшего анализа во внешних средах (Python, R, MATLAB, Statistica). Платформа доступна через веб-интерфейс (HTTP/HTTPS) как с настольных, так и с мобильных устройств, обеспечивая мониторинг в режиме, близком к реальному времени.

3.3. Общая характеристика гидрохимического и газового режима

Статистические характеристики основных зарегистрированных параметров за весь период наблюдений представлены в Таблице 2.

Физико-химические условия. Температурный режим демонстрировал типичный для водохранилищ средней полосы сезонный ход: максимальные значения ($27,4^\circ\text{C}$) пришлись на конец июля – начало августа с последующим постепенным снижением до $7,7^\circ\text{C}$ к концу октября (помесячные средние снижались от $23,9^\circ\text{C}$ в июле до $10,4^\circ\text{C}$ в октябре). Суточная амплитуда температуры воды была невелика и закономерно убывала от лета к осени (от $\sim 1,5^\circ\text{C}$ в июле до $\sim 0,4^\circ\text{C}$ в октябре), что отражает высокую теплоёмкость водной массы и ослабление радиационного прогрева к концу сезона.

Значения pH изменялись от 7,52 до 9,38 (среднее $8,18 \pm 0,37$), с максимумами в летние месяцы (июль–август, среднее $8,36 \pm 0,41$). Суточная динамика pH была синхронна с динамикой растворённого кислорода: минимум приходился на пред-рассветные часы, максимум – на вторую половину дня. Динамика CO_2 , напротив, находилась в противофазе с pH и DO, что отражает единый суточный цикл фотосинтеза и дыхания. Суточная амплитуда pH закономерно убывала от лета к осени (от 0,44 ед. в июле до 0,09 ед. в октябре).

Электропроводность варьировала от 281,0 до $375,7 \text{ мкСм}\cdot\text{см}^{-1}$ (среднее $334,5 \pm 13,7 \text{ мкСм}\cdot\text{см}^{-1}$). В летний межледный период прослеживался общий тренд к росту (от $\sim 300 \text{ мкСм}\cdot\text{см}^{-1}$ в середине июля до $\sim 355 \text{ мкСм}\cdot\text{см}^{-1}$ во второй половине августа), на фоне которого выделялись эпизоды резкого кратковременного снижения значений (до $40 \text{ мкСм}\cdot\text{см}^{-1}$ за сутки). Сопоставление с метеоданными показало, что эти эпизоды во многом совпадают по времени с периодами ливневых осадков на водосборе, вызывающими кратковременное разбавление поверхностных водных масс слабоминерализованным стоком.

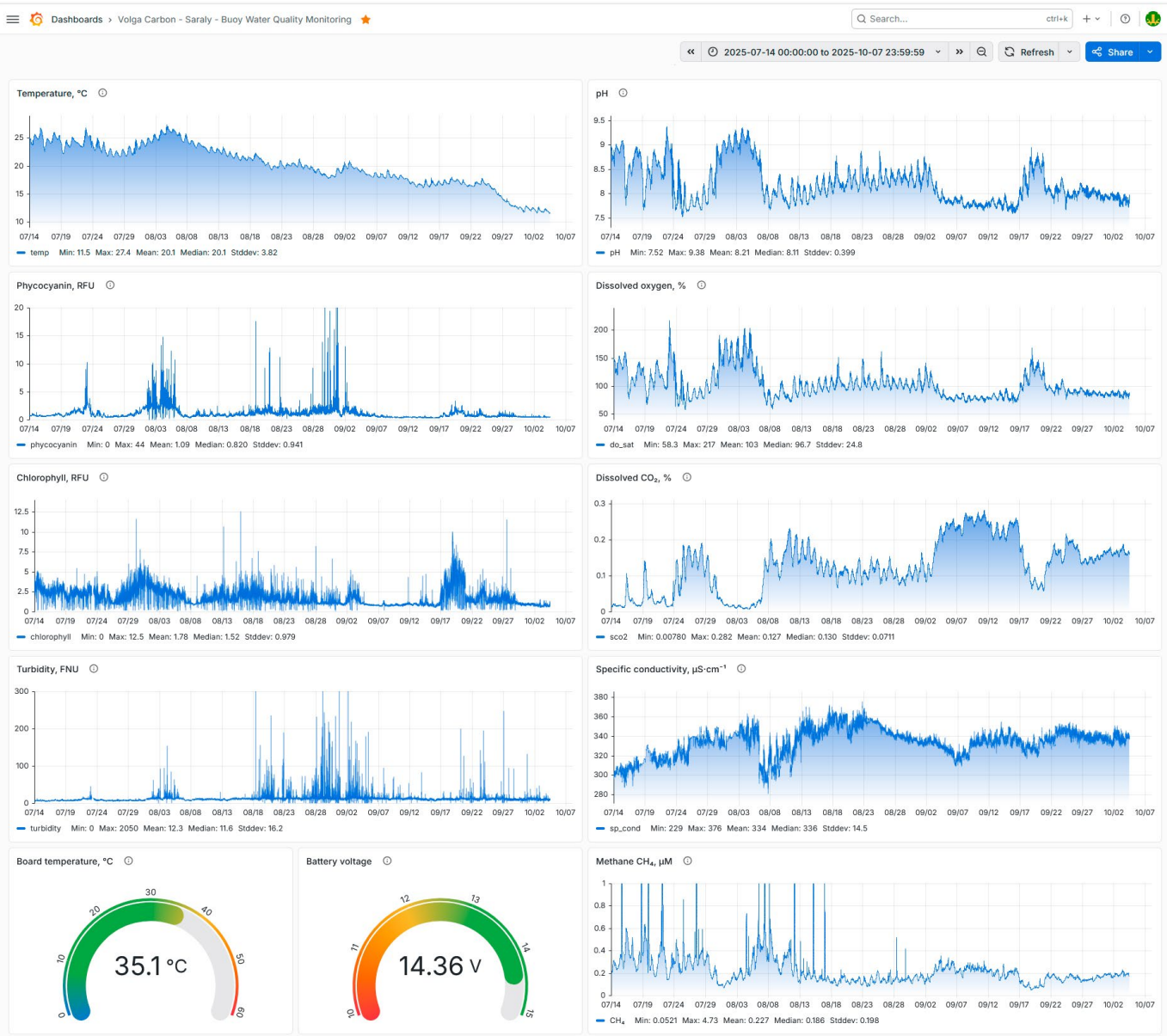


Рис. 4. Интерфейс веб-дашборда Grafana для мониторинга параметров АБС.

Таблица 2. Статистические характеристики параметров, зарегистрированных АБС (июль–октябрь 2025 г., n = 34 725).

Параметр	Единицы	Среднее	Медиана	Минимум	Максимум	Ст. откл.
Температура воды	°C	18,21	18,75	7,70	27,37	5,26
pH	ед. pH	8,18	8,08	7,52	9,38	0,37
Электропроводность (УЭП)	мкСм·см ⁻¹	334,53	336,41	281,00	375,71	13,66
Растворённый кислород (DO)	мг·л ⁻¹	9,51	9,33	4,96	17,32	1,79
DO, насыщение	%	101,07	94,77	58,30	216,84	23,02
Хлорофилл-а	ОЕФ	1,55	1,24	0,00	12,45	0,95
Хлорофилл-а	мкг·л ⁻¹	6,23	4,99	0,00	50,10	3,82
Фикоцианин	ОЕФ, мкг·л ⁻¹	0,77	0,49	0,00	43,77	0,89
Мутность*	ЕМФ	12,16	10,95	0,00	503,30	9,93
Растворённый CH ₄	мкмоль·л ⁻¹	0,212	0,173	0,052	4,726	0,182
Растворённый CO ₂	мг·л ⁻¹	2,40	2,43	0,11	5,19	1,28

Примечание: * – из исходного массива исключены два артефактных значения мутности (956,7 и 2048,8 ЕМФ),кратно превышавших соседние значения ряда и не подтверждённых синхронным откликом других параметров.

Кроме того, поскольку исследуемый участок находится в зоне взаимодействия волжских и камских водных масс, не исключено, что подобные флуктуации УЭП частично обусловлены сменой гидродинамического режима водохранилища: усиление попуска более мягких волжских вод через Чебоксарский гидроузел может вызывать временное смещение зоны смешения и вытеснение более минерализованных камских вод.

Мутность в целом находилась на низком уровне (среднее 12,2 ЕМФ, медиана 10,9 ЕМФ), при этом 99,5 % значений не превышали 100 ЕМФ. На этом фоне в летне-осенний период зафиксированы эпизодические повышения до 503 ЕМФ. Совместный анализ динамики параметров и метеоусловий позволил разделить пики мутности по их генезису на два типа: биогенные (летние) и абиогенные (осенние). Природу летних максимумов (июль–август) раскрывает анализ корреляционных связей и временных трендов: в этот период пики мутности синхронны с максимальными концентрациями фикоцианина (Рис. 5), обнаруживая с ним статистически значимую, хотя и умеренную положительную связь (коэффициент корреляции Пирсона $r = 0,14$; здесь и далее $p < 0,01$) при отсутствии существенной связи с хлорофиллом-*a* ($r = -0,06$). Это указывает на преимущественно биогенный характер летних экстремумов, вызванных развитием колониальных форм цианобактерий, формирующих крупные агрегаты в период цветения воды, тогда как более мелкие клетки зелёных водорослей на общую мутность практически не влияли. Напротив, наиболее мощные осенние подъёмы мутности (с пиками 12–13 и 20–22 октября) имели терригенно-абиогенную природу. В эти периоды концентрация фикоцианина находилась на минимальном уровне, однако, по данным метеорологических архивов, отмечалось усиление скорости ветра до 6–10 м/с (с порывами до 14 м/с) 12–13 октября и до 4–5 м/с (с порывами до 11–12 м/с) 20–21 октября. В обоих случаях ветер имел юго-восточное и восточное направление, то есть дул со стороны открытого Волго-Камского плёса – обширной акватории, обеспечивающей максимальный разгон для формирования волновых процессов. Штормовое воздействие привело к интенсивному гидродинамическому перемешиванию водной толщи и взмучиванию минерального материала со значительных площадей прилегающих мелководий (преобладающие глубины 2–4 м), что независимо подтверждается анализом спутниковых снимков Sentinel-2 за этот период.

Сезонная и суточная динамика кислорода и фитопланктона. Кислородный режим отражал баланс между фотосинтезом и деструкцией органического вещества. Среднее насыщение воды кислородом за весь период составило 101,1 %, однако размах варьирования был крайне высок (58,3–216,8 %). Чётко прослеживался сезонный тренд: от максимальной продукции в июле (среднее насыщение 116,0 %) к минимальной в октябре (90,8 %), что обусловлено убыванием солнечной радиации и снижением температуры воды к концу вегетационного

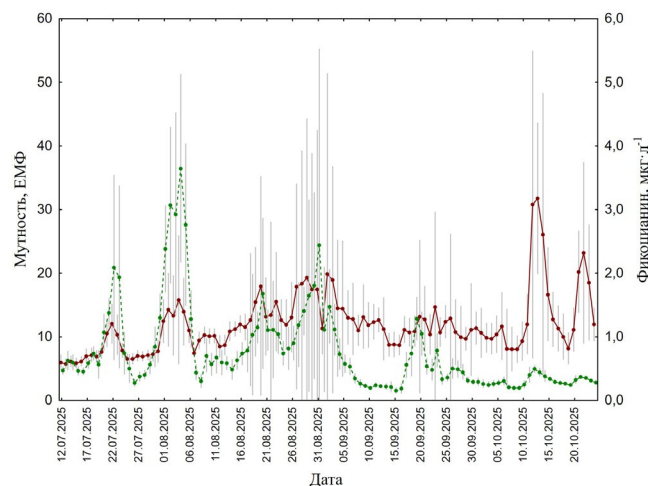


Рис. 5. Сезонная динамика мутности (сплошная красная линия, ЕМФ) и фикоцианина (пунктирная зеленая линия, $\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$) за период наблюдений; среднее $\pm$ стандартное отклонение.

сезона. Анализ данных выявил устойчивую суточную динамику. Ночной минимум DO, связанный с дыханием планктонного сообщества и окислением лабильного органического вещества, приходился на 04:00–06:00. При этом в июле и августе ночные минимумы оставались на высоком уровне (98,8 % и 97,1 % соответственно), а наиболее выраженное снижение ночного насыщения отмечено в сентябре (86,1 %) и октябре (88,7 %), что указывает на интенсификацию деструкционных процессов. Дневной максимум DO, обусловленный фотосинтезом, закономерно регистрировался в дневное время (13:00–19:00), плавно снижаясь от лета к осени (июль – до 131,1 %; август – до 122,3 %; сентябрь – до 97,9 %; октябрь – до 93,7 %). Суточная амплитуда также закономерно убывала (июль – ~ 32 %; октябрь – ~ 5 %), отражая сезонное снижение биологической активности сообщества. Параметры фитопланктона (хлорофилл-*a* и фикоцианин) подтверждают эту картину и демонстрируют выраженный сезонный тренд. В пик вегетационного сезона средние концентрации хлорофилла-*a* составили $9,26 \pm 3,58 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ в июле и $6,77 \pm 2,98 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ в августе, что хорошо согласуется с литературными данными для мезо-эвтрофных участков Куйбышевского водохранилища в летний период (Mineeva et al., 2022, 2025). Основная масса измерений хлорофилла-*a* в эти месяцы (77 % записей) находилась в фоновом диапазоне до $10 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$, 22,6 % – в диапазоне 10–20 $\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$; на значения выше 20 $\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ приходилось менее 0,5 % общего массива данных. Эпизодические повышения до 46–50 $\text{мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ отражают кратковременные всплески развития фитопланктона. К концу наблюдений продуктивность фитопланктона закономерно снижалась: средние концентрации хлорофилла-*a* упали до $5,79 \pm 4,38 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ в сентябре и $3,63 \pm 1,63 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ в октябре, что отражает сезонное угасание вегетационных процессов. Пиковые значения фикоцианина достигали $12,85 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ в июле и $43,77 \text{ мкг} \cdot \text{л}^{-1}$ в августе, что указывает на доминирование цианобактерий

в конце лета. Регулярные количественные измерения фикоцианина на водохранилищах Волжского каскада практически не проводятся, что подчёркивает новизну и дополнительную ценность полученных высокочастотных рядов данных.

Валидация данных оптических датчиков (оценка артефактов). Поскольку показания оптических и флуориметрических датчиков (мутность, хлорофилл-*a*, фикоцианин) потенциально подвержены артефактам (пузырьки воздуха, кратковременное экранирование оптического пути), полученные высокочастотные ряды были дополнительно проверены на наличие аномальных значений. За исключением двух указанных выше единичных выбросов мутности (956,7 и 2048,8 ЕМФ), исключённых из анализа, характер распределения остальных данных свидетельствует в пользу их природной (биогенной и гидродинамической), а не аппаратной природы:

1. Форма распределения. Все три параметра характеризуются непрерывным, правоасимметричным распределением без изолированных разрывов в хвосте структуры данных. Доля значений мутности выше 100 ЕМФ составляет всего 0,5 % и плавно убывает вплоть до максимума 503,3 ЕМФ; аналогичная картина плавного снижения частот в области экстремальных значений характерна для хлорофилла-*a* и фикоцианина. Такая структура типична для стохастических природных процессов и нехарактерна для случайных сбоев электроники, которые обычно дают резко обособленные,кратно завышенные изолированные выбросы.
2. Согласованность с независимыми биогеохимическими закономерностями. Пиковые значения хлорофилла-*a* и фикоцианина закономерно приходятся на дневные часы – период максимальной инсоляции и интенсивного фотосинтеза, что физически невозможно при случайном механическом засорении оптического окна датчика. Это подтверждается статистически значимыми корреляциями: концентрации хлорофилла-*a* и фикоцианина связаны между собой, с рН и насыщением воды кислородом, а также обнаруживают устойчивую обратную связь с растворённым CO_2 . Иными словами, всплески оптических показателей синхронны с ожидаемым физико-химическим откликом экосистемы на продукционные процессы.
3. Сезонная и гидрометеорологическая обусловленность. Максимумы фикоцианина и хлорофилла-*a* приурочены к июлю–августу – периоду, наиболее благоприятному для развития вегетации цианобактерий в водохранилищах Средней Волги. В свою очередь, зафиксированные экстремумы мутности, как было показано выше, детерминированы либо пиками цветения (в летний период), либо штормовыми нагонными явлениями с открытого плёса (в осенний период), что подтверждается независимыми метеорологическими и спутниковыми данными.

Таким образом, за исключением двух подтверждённых аппаратных артефактов мутности, зарегистрированные флуктуации оптических параметров отражают реальные гидробиологические и гидрологические процессы и могут использоваться для дальнейшего анализа.

Динамика растворённых парниковых газов. Концентрация растворённого CH_4 варьировала в широком диапазоне – от 0,052 до 4,726 мкмоль·л⁻¹ (медиана 0,173 мкмоль·л⁻¹). Равновесная с атмосферой концентрация ($C_{\text{eq}} \approx 2,7$ нмоль·л⁻¹, рассчитана по закону Генри при атмосферной мольной доле $\text{CH}_4 \sim 1,9$ ppm (Никитин и др., 2026) и константе Генри $K_{\text{H}} \approx 1,4 \times 10^{-3}$ моль·л⁻¹·атм⁻¹ (Sander, 2023)) более чем на два порядка ниже наблюдаемых значений, что даёт пересыщение поверхностного слоя воды в 55–110 раз (по медианным месячным значениям) и указывает на то, что водохранилище на исследуемом участке в течение всего безледного периода выступает источником метана для атмосферы.

Наибольшая изменчивость и наиболее высокие пиковые значения CH_4 отмечены в летний период, после чего концентрация стабилизировалась на уровне 0,15–0,18 мкмоль·л⁻¹ в сентябре–октябре. Анализ частотного распределения показал, что эпизоды с концентрацией выше 500 нмоль·л⁻¹ – условно ассоциируемые с кратковременными событиями пузырьковой дегазации (эбулляции), а не с фоновой диффузией, – составили в целом за период наблюдений 2,70 % записей. Их сезонное распределение при этом крайне неравномерно: в июле доля таких эпизодов достигала 8,03 %, в августе – 4,18 %, тогда как в сентябре и октябре значения выше 500 нмоль·л⁻¹ не зарегистрированы ни разу. Такая приуроченность экстремумов к тёплому периоду хорошо согласуется с известной зависимостью интенсивности эбуллической эмиссии CH_4 от температуры и характерна для мелководных эвтрофных водохранилищ. Дополнительным подтверждением служит корреляция эпизодов высокого CH_4 с периодами пониженного насыщения воды кислородом ($r = -0,32$) и повышенной температуры воды ($r = 0,31$), что характерно для активизации метаногенеза в придонном слое с последующей дегазацией.

Полученная оценка частоты эпизодов пузырьковой дегазации (5,6 % записей за июль–август) хорошо согласуется с результатами независимых измерений методом плавучих камер, выполненных на том же участке в летне-осенний период 2024 г. (Nikitin et al., 2026). Из 22 камерных измерений на станции открытого мелководья одно аномально высокое значение потока (271,6 мг CH_4 ·м⁻²·сут⁻¹) было атрибутировано эпизоду пузырькового выброса, что составляет 4,5 % – величину того же порядка, что и оценка по данным АБС. Следует отметить, что оценка по камерным данным основана на ограниченной выборке ($n = 22$) и потому имеет широкий доверительный интервал; тем не менее совпадение порядков величин может служить дополнительным косвенным подтверждением реальности выявленных эпизодов и согласуется с

представлением о том, что эпизодический пузырьковый транспорт является устойчивой характеристикой исследуемого участка.

Растворённый CO_2 изменялся от 0,11 до 5,19 $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$, демонстрируя выраженный сезонный ход, противоположный динамике CH_4 : минимальные концентрации (медиана 0,59 $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$) зафиксированы в июле, в период максимальной фотосинтетической активности (режим нетто-автотрофии за счёт активного потребления CO_2), тогда как к сентябрю медиана возрастала до 3,53 $\text{мг}\cdot\text{л}^{-1}$, что указывает на смещение баланса к нетто-гетеротрофии по мере ослабления фотосинтеза и усиления деструкции органического вещества. Наиболее наглядно суточная противофазная динамика DO и CO_2 проявляется в летний период (Рис. 6). Ночной минимум концентрации растворённого кислорода (в среднем $\sim 8,5 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) приходится на те же часы, что и предрассветный максимум CO_2 ($\sim 1,81 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$), – 05:00–06:00. В дневные часы наблюдается обратная картина: к 17:00–18:00 концентрация DO достигает суточного максимума ($\sim 10,7 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) при падении содержания CO_2 до минимальных значений ($\sim 1,17 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$). Аналогичный характер суточного хода CO_2 и DO, обусловленный единым циклом фотосинтеза и деструкции органического вещества, был ранее описан для литорали Южного Байкала в период гидрологического лета (Domysheva et al., 2013), что подтверждает универсальность этого механизма для пресноводных экосистем.

Корреляционный анализ. Для оценки внутренней согласованности данных и выявления ключевых биогеохимических связей был проведён корреляционный анализ всего массива наблюдений. Выявленные зависимости носят закономерный характер и полностью согласуются с современными представлениями о функционировании эвтрофных водоёмов.

Концентрации хлорофилла-а и фикоцианина положительно коррелируют с pH ($r = 0,63$ и $r = 0,61$) и насыщением воды кислородом ($r = 0,66$ и $r = 0,60$), а также обнаруживают обратную связь с содержанием растворённого CO_2 ($r = -0,62$ и $r = -0,51$). Это отражает сопряжённость параметров в рамках единого продукционного цикла: в дневные часы интенсивное фотосинтетическое потребление CO_2 планктонным сообществом приводит к сдвигу карбонатного равновесия в сторону повышения pH и сопровождается синхронным ростом концентрации пигментов и насыщения воды кислородом. Отрицательные связи с CO_2 подтверждают, что в периоды пиковой вегетации поверхностный слой водохранилища выступает стоком, а не источником диоксида углерода для атмосферы (Nikitin et al., 2025).

Между собой хлорофилл-а и фикоцианин коррелируют умеренно положительно ($r = 0,36$), что указывает на сопряжённое развитие различных групп фитопланктона, включая ассоциированные с ними сообщества цианобактерий. Оба параметра ожидаемо связаны с температурой воды ($r = 0,48$ для хлорофилла-а и $r = 0,40$ для фикоцианина),

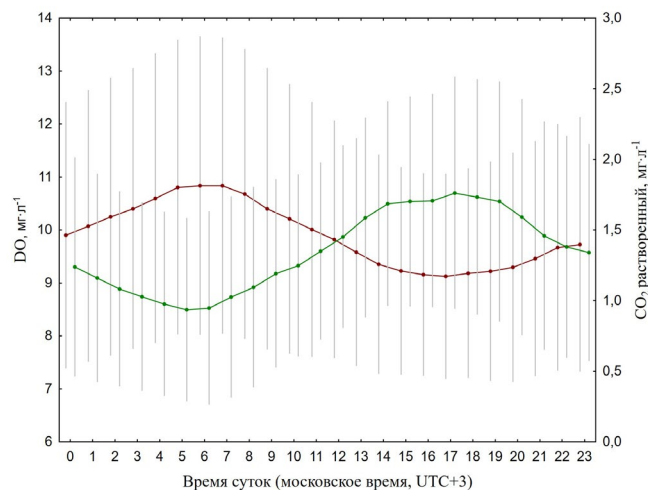


Рис. 6. Суточная динамика растворённого кислорода (DO, зелёная линия) и растворённого CO_2 (красная линия) в летние месяцы (июль–август 2025 г.); среднее $\pm$ стандартное отклонение.

отражая сезонный ход вегетационного периода с максимумом продуктивности в наиболее тёплые летние месяцы (июль–август).

Наиболее сильные статистические связи зафиксированы в триаде гидрохимических параметров: между pH, насыщением кислородом (DO_{sat}) и растворённым CO_2 (pH vs DO_{sat} : $r = 0,96$; pH vs CO_2 : $r = -0,87$; DO_{sat} vs CO_2 : $r = -0,80$). Такие высокие коэффициенты корреляции согласуются с сопряжённым влиянием фотосинтеза, дыхания и динамики карбонатной системы и указывают на высокую степень внутренней согласованности одновременно измеряемых параметров.

Следует отметить, что высокочастотные ряды наблюдений характеризуются временной автокорреляцией, а большой объём выборки ($n = 34\,725$) делает формально значимыми даже весьма слабые связи. В связи с этим коэффициенты корреляции интерпретируются нами прежде всего как мера направления и силы связи между параметрами, а не как строгий тест на статистическую значимость.

В целом основные измеренные параметры (температура, растворённый кислород, pH, электропроводность, мутность), наиболее часто используемые при мониторинге водохранилищ, демонстрируют закономерную сезонную и суточную динамику, согласующуюся с многолетними данными для Куйбышевского водохранилища (Куйбышевское..., 2008; Латыпова и др., 2023). Полученные ряды хлорофилла-а по диапазону значений и сезонному ходу согласуются с результатами многолетних наблюдений за фитопланктоном исследуемого водоёма (Mineeva et al., 2022, 2025). Структура корреляционных связей указывает на высокую внутреннюю согласованность массива данных и его соответствие известным биогеохимическим закономерностям. Проведённый анализ оптических показателей на наличие артефактов, основанный на оценке формы распределения и сопряжённости экстремумов с независимыми гидрохимическими индикаторами (pH, DO, CO_2), показал, что зарегистрированные пики хлорофилла-а, фикоцианина

и мутности (за исключением двух исключённых единичных выбросов) обусловлены реальными природными процессами (вегетацией цианобактерий и ветровым взмучиванием). Это подтверждает, что данные, полученные автономной буйковой станцией в тестовом режиме эксплуатации, адекватно отражают гидрохимическую и гидробиологическую обстановку. Сформированные высокочастотные ряды могут служить надежной основой для дальнейшего, более детального анализа сезонной и суточной изменчивости газового и биопродукционного режимов водохранилища, который планируется представить в отдельной публикации.

3.4. Интеграция с системой eddy covariance и обмен данными

Синхронизация данных АБС с системой ТП, измеряющей 30-минутные потоки CH_4 и CO_2 , выполняется на основе единой шкалы UTC. 4-минутные записи АБС агрегируются до получасовых интервалов, соответствующих периодам осреднения ТП (например, 00:00–00:30, 00:30–01:00). Агрегация выполняется по медиане (для снижения влияния выбросов) либо по среднему значению.

Для совместного анализа в PostgreSQL/ TimescaleDB создается объединенный набор данных (в виде материализованного представления или отдельной таблицы) с 30-минутным разрешением. Этот набор интегрирует агрегированные параметры АБС (гидрохимические и газовые переменные) с потоками ТП (CH_4 и CO_2) и метеорологическими переменными с метеостанции (температура воздуха, влажность, скорость и направление ветра, атмосферное давление, солнечная радиация). Потоки выражаются в $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot(30\text{ мин})^{-1}$ для CH_4 и $\text{г}\cdot\text{м}^{-2}\cdot(30\text{ мин})^{-1}$ для CO_2 . Для отчетности и сравнения с другими исследованиями эти значения при

постобработке пересчитываются в часовые и суточные суммы или средние (например, $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{ч}^{-1}$ и $\text{мг}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{сут}^{-1}$ для CH_4).

Результирующий набор данных экспортируется в CSV для дальнейшего статистического анализа, включая оценку временных задержек, корреляционный анализ и параметризацию моделей газообмена. Оценка временной задержки между изменениями концентрации растворенных ПГ (данные АБС) и последующими изменениями потоков CH_4 и CO_2 (данные ТП) выполняется методом максимизации кросс-корреляционной функции (CCF) при сдвигах от 0 до 120 минут. Этот подход широко используется для количественной оценки временных смещений в экологических временных рядах (Vitale et al., 2024).

3.5. Интеграция с другими методами наблюдений на карбоновом полигоне

АБС является важным компонентом интегрированной системы мониторинга ПГ на водном участке карбонового полигона «Карбон – Поволжье» (Рис. 7). Помимо АБС, на участке работают четыре дополнительные системы наблюдений: система eddy covariance на стационарном понтоне (Nikitin et al., 2025); плавучие камеры для дискретных измерений потоков ПГ (Nikitin et al., 2026); платформы дистанционного зондирования, включая многоцелевой гидрографический надводный аппарат Apache 4 Pro (CHC Navigation, Китай), оснащенный двухчастотным эхолотом, GNSS-приемником и датчиком качества воды Y4000 (Yosemitech, Китай) для батиметрической съемки и пространственного картирования качества воды; а также беспилотные летательные аппараты и спутниковые наблюдения (Sentinel, Landsat) для оценки пространственной изменчивости по акватории водохранилища



Рис. 7. Комплекс оборудования на водном участке карбонового полигона «Карбон – Поволжье»: 1 – система ТП на стационарно заякоренном понтоне; 2 – АБС; 3 – плавучие камеры; 4 – беспилотный надводный аппарат Apache.

(Никитин и др., 2024; Хомяков и Усманов, 2025; Gafurov et al., 2024; Nikitin et al., 2024). Интеграция этих подходов обеспечивает решение задач валидации, калибровки, масштабирования и перекрестной верификации, недостижимых при использовании какого-либо одного метода.

Интеграция наблюдений АБС и ТП позволяет анализировать связи между концентрациями растворенных газов (CH_4 и CO_2) в поверхностном слое воды и их турбулентными потоками в атмосферу. Это также дает возможность оценивать временные задержки между изменениями концентраций растворенных газов (например, при дегазации или фотосинтезе) и соответствующими изменениями потоков, а также рассчитывать коэффициенты газообмена (k_{600}) с использованием данных о ветре и концентрационных градиентах для эмпирической оценки моделей.

Сравнение наблюдений АБС с дискретными измерениями ПК позволяет верифицировать *in situ* датчики ПГ через сопоставление концентраций растворенных CH_4 и CO_2 с косвенными оценками потоков, полученными с использованием диффузионной модели тонкого пограничного слоя. Этот подход также позволяет оценить пузырьковую составляющую эмиссии CH_4 : когда потоки, измеренные камерами, существенно превышают расчетные диффузионные потоки (на основе данных METS и оцененных по ветру коэффициентов газообмена), можно сделать вывод о пузырьковом транспорте. Кроме того, наблюдения ПК поддерживают калибровку пространственных эмиссионных моделей на основе непрерывных точечных измерений АБС.

Совместное использование наблюдений АБС с данными с беспилотных надводных и летательных аппаратов, а также со спутников способствует разработке региональных биооптических моделей через калибровку связей между спектральными характеристиками и измеренными *in situ* концентрациями хлорофилла, фикоцианина и взвешенного вещества. Эти модели позволяют оценить распределение биомассы фитопланктона по всему водохранилищу, выявить связи между интенсивностью «цветения» и концентрациями растворенных ПГ, а также выполнить пространственное масштабирование от точечных наблюдений на всю акваторию.

4. Выводы

На карбоновом полигоне «Карбон – Поволжье» успешно разработана и введена в эксплуатацию автономная буйковая станция. Насколько нам известно, впервые в России мультипараметрический зонд YSI EXO2s был интегрирован с прямыми *in situ* датчиками CH_4 (METS) и CO_2 (AMT) в составе единой АБС, что позволило осуществлять одновременный высокочастотный мониторинг гидрохимических параметров и концентраций растворенных ПГ в режиме, близком к реальному времени. Реализованная инфраструктура – включающая 4G-передачу, сервер на Python, хранение в PostgreSQL/TimescaleDB и визуализацию в Grafana – обеспечивает син-

хронизацию данных с 4-минутным разрешением. За время развертывания (июль–октябрь 2025 г.) система собрала около 35 тыс. записей, зафиксировав суточную и сезонную изменчивость, включая кратковременные пики концентраций CH_4 , потенциально связанные с пузырьковым транспортом. Предложенная архитектура АБС может служить основой для региональных сетей мониторинга ПГ. Дальнейшие исследования будут направлены на количественную оценку вклада диффузионного и пузырькового транспорта в общий поток метана, а также на верификацию моделей эмиссии для всего водохранилища с целью уточнения регионального углеродного бюджета.

Благодарности

Исследование выполнено за счет 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

- Воронич С.С., Роева Н.Н., Хлопаев А.Г. 2024. Организация наблюдений за качеством природной воды на территории Московской области. Проблемы региональной экологии 1: 81–84. DOI: [10.24412/1728-323X-2024-1-81-84](https://doi.org/10.24412/1728-323X-2024-1-81-84)
- 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)
- Дзюбан А.Н. 2016. Цикл метана в грунтах водохранилищ Волжско-Камского каскада и его роль в деструкции органического вещества. Труды Института биологии внутренних вод 74 (77): 21–36. DOI: [10.24411/0320-3557-2016-10008](https://doi.org/10.24411/0320-3557-2016-10008)
- Куйбышевское водохранилище (научно-информационный справочник). 2008. В: Розенберг Г.С., Выхристюк Л.А. Тольятти: ИЭВБ РАН.
- 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)
- Минакова Е.А., Шлычков А.П., Кондратьев С.А. и др. 2025. Количественная оценка диффузной биогенной нагрузки, обусловленной воздействием сельского хозяйства, на водосборах Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ в границах Республики Татарстан. Труды Карельского научного центра Российской академии наук 6: 57–69. DOI: [10.17076/lim2069](https://doi.org/10.17076/lim2069)
- 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. 2025а. 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., Кузьмин Р.С. и др. 2025b. Площадь мелководий Куйбышевского водохранилища при различных эксплуатационных уровнях. В: Экология родного края: проблемы и пути их решения. Киров: ВятГУ, С. 44–49. ISBN: 978-5-98228-289-7.

Никитин О.В., Степанова Н.Ю., Кузьмин Р.С. и др. 2026. Содержание метана в атмосфере Республики Татарстан по данным спутникового мониторинга: глобальные тренды и региональные особенности. Российский журнал прикладной экологии 1(45): 21–35. DOI: [10.24852/2411-7374.2026.1.21.35](https://doi.org/10.24852/2411-7374.2026.1.21.35)

Поздняков Ш.Р., Кондратьев С.А. 2022. Диффузная биогенная нагрузка – возможная причина антропогенного эвтрофирования водоемов. Российский журнал прикладной экологии 4(32): 36–43. DOI: [10.24852/2411-7374.2022.4.36.43](https://doi.org/10.24852/2411-7374.2022.4.36.43)

Селезнева А.В., Беспалова К.В., Селезнев В.А. 2018. Содержание растворенного неорганического фосфора в воде Куйбышевского водохранилища. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление 2: 35–45. DOI: [10.35567/1999-4508-2018-2-3](https://doi.org/10.35567/1999-4508-2018-2-3)

Федоров Ю.А., Гарькуша Д.Н., Косолапов А.Е. и др. 2024. Искусственные водоемы как очаги метаногенеза (на примере Цимлянского водохранилища). Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление 3: 68–82. DOI: [10.35567/19994508-2024-3-68-72](https://doi.org/10.35567/19994508-2024-3-68-72)

Хомяков П.В., Усманов Б.М. 2025. Современные батиметрические исследования мелководий Куйбышевского водохранилища. В: Современные проблемы водохранилищ и их водосборов. Пермь: ПГНИУ, С. 229–233. ISBN: 978-5-7944-4262-5.

Abril G., Richard S., Guérin F. 2006. In situ measurements of dissolved gases (CO₂ and CH₄) in a wide range of concentrations in a tropical reservoir using an equilibrator. Science of the Total Environment 354(2–3): 246–251. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2004.12.051](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.12.051)

Aslamov I.A., Makarov M.M., Gnatovsky R.Yu. et al. 2020. Observation results of hydrophysical and hydrochemical parameters in the littoral zone of Lake Baikal. Limnology and Freshwater Biology 5: 1073–1075. DOI: [10.31951/2658-3518-2020-a-5-1073](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2020-a-5-1073)

Bastviken D., Johnson M.S. 2025. Future methane emissions from lakes and reservoirs. Nature Water 3(12): 1397–1410. DOI: [10.1038/s44221-025-00532-6](https://doi.org/10.1038/s44221-025-00532-6)

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)

Błażejowski A., Pecolt S., Grunt M. et al. 2024. Multi-domain, autonomous measurement buoy as an element of the water quality monitoring and early warning system in rivers and water reservoirs. Rocznik Ochrona Środowiska 26: 18–29. DOI: [10.54740/ros.2024.002](https://doi.org/10.54740/ros.2024.002)

Bodmer P., Bors C., Liu L. et al. 2025. Large sediment methane production potential in reservoirs compared to lakes and rivers. Limnology and Oceanography 70(6): 1561–1574. DOI: [10.1002/lno.70063](https://doi.org/10.1002/lno.70063)

Boulart C., Connelly D.P., Mowlem M.C. 2010. Sensors and technologies for in situ dissolved methane measurements and their evaluation using Technology Readiness Levels.

TrAC Trends in Analytical Chemistry 29(2): 186–195. DOI: [10.1016/j.trac.2009.12.001](https://doi.org/10.1016/j.trac.2009.12.001)

Domysheva V.M., Sakirko M.V., Pestunov D.A. et al. 2013. Seasonal behavior of the CO₂ gas exchange process in the “atmosphere-water” system of littoral zone of Southern Baikal. 2. Hydrological summer. Atmospheric and Oceanic Optics 26(2): 163–169. DOI: [10.1134/s1024856013020085](https://doi.org/10.1134/s1024856013020085)

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)

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: 1047. DOI: [10.1051/bioconf/202412601047](https://doi.org/10.1051/bioconf/202412601047)

Korneva L.G., Solovyeva V.V., Makarova O.S. et al. 2025. Current state of phytoplankton in the Volga, Kama, Don, and Volga–Don Canal reservoirs (summer 2015–2018) under conditions of a changing climate and continuing eutrophy. Inland Water Biology 18(1): 26–44. DOI: [10.1134/S1995082925700026](https://doi.org/10.1134/S1995082925700026)

Koschorreck M., Kamjunke N., Koedel U. et al. 2024. Diurnal versus spatial variability of greenhouse gas emissions from an anthropogenically modified lowland river in Germany. Biogeosciences 21(6): 1613–1628. DOI: [10.5194/bg-21-1613-2024](https://doi.org/10.5194/bg-21-1613-2024)

Lami A., Rogora M., Austoni M. et al. 2025. High frequency data from in-situ sensors as a support to long-term ecological research on aquatic ecosystems. ARPHA Conference Abstracts 8: e151707. DOI: [10.3897/aca.8.e151707](https://doi.org/10.3897/aca.8.e151707)

Leng P., Rode M., Koschorreck M. 2025. Summer drought enhances diurnal amplitude of CO₂ in two German rivers of different size. Water Research 271: 122870. DOI: [10.1016/j.watres.2024.122870](https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.122870)

Liu S., Xue M., Cui X. et al. 2023. A review on the methane emission detection during offshore natural gas hydrate production. Frontiers in Energy Research 11: 1130810. DOI: [10.3389/fenrg.2023.1130810](https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1130810)

Loken L.C., Crawford J.T., Schramm P.J. et al. 2019. Large spatial and temporal variability of carbon dioxide and methane in a eutrophic lake. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences 124(7): 2248–2266. DOI: [10.1029/2019jg005186](https://doi.org/10.1029/2019jg005186)

Makarov M., Aslamov I., Gnatovsky R. 2021. Environmental monitoring of the littoral zone of Lake Baikal using a network of automatic hydro-meteorological stations: development and trial run. Sensors 21(22): 7659. DOI: [10.3390/s21227659](https://doi.org/10.3390/s21227659)

Marcé R., George G., Buscarinu P. et al. 2016. Automatic high frequency monitoring for improved lake and reservoir management. Environmental Science & Technology 50(20): 10780–10794. DOI: [10.1021/acs.est.6b01604](https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01604)

Mineeva N.M., Semadeni I.V., Solovyeva V.V. et al. 2022. Chlorophyll content and the modern trophic state of the Volga River reservoirs (2019–2020). Inland Water Biology 15(4): 410–414. DOI: [10.1134/s1995082922040393](https://doi.org/10.1134/s1995082922040393)

Mineeva N.M., Semadeni I.V., Makarova O.S. 2025. Plant pigments in water of the Volga River reservoirs: current status and trends in long-term changes. Inland Water Biology 18(1): 1–14. DOI: [10.1134/S1995082924600212](https://doi.org/10.1134/S1995082924600212)

Nazarious M.I., Zorzano M.-P., Martin-Torres J. 2023. Sub-liquid and atmospheric measurement instrument to autonomously monitor the biochemistry of natural aquatic ecosystems. ACS ES&T Water 3(8): 2338–2354. DOI: [10.1021/acsestwater.3c00082](https://doi.org/10.1021/acsestwater.3c00082)

Nikitin O., Stepanova N., Gubeeva S. et al. 2024. Assessment of methane levels throughout a temperate reser-

voir 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., Aukhadeev T.R. et al. 2025. Greenhouse gas fluxes (CH_4 , CO_2) from the Kuibyshev Reservoir: an eddy covariance study. *Limnology and Freshwater Biology* 4: 995–1012. DOI: [10.31951/2658-3518-2025-A-4-995](https://doi.org/10.31951/2658-3518-2025-A-4-995)

Nikitin O.V., Stepanova N.Y., Novikova L.V. et al. 2026. Methane emissions from the shallow water zone of the Kuibyshev Reservoir: a floating chamber study. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management* 1: 76–93. DOI: [10.35567/1999-4508-2026-1-76-93](https://doi.org/10.35567/1999-4508-2026-1-76-93)

Olchev A.V., Gulev S.K. 2024. Carbon flux measurement supersites of the Russian Federation: objectives, methodology, prospects. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 60(S3): S428–S434. DOI: [10.1134/S0001433824700841](https://doi.org/10.1134/S0001433824700841)

Pestunov D.A., Panchenko M.V., Shmargunov V.P. 2008. A device for measuring the content of CO_2 dissolved in water. *Physical Instruments for Ecology, Medicine, and Biology* 51: 773–774. DOI: [10.1134/S0020441208050229](https://doi.org/10.1134/S0020441208050229)

Pestunov D.A., Domysheva V.M., Shamrin A.M. et al. 2025. Carbon fluxes in the process of gas exchange of CO_2 and CH_4 in the atmosphere–aquatic system of the coastal zone of Lake Baikal. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics* 61(S1): S59–S65. DOI: [10.1134/S000143382570094X](https://doi.org/10.1134/S000143382570094X)

Rabaey J.S., Lewis A.S.L., Attermeyer K. et al. 2026. Depth-resolved carbon dioxide and methane concentrations in 522 lakes, ponds, and reservoirs worldwide. *Scientific Data* 13: 483. DOI: [10.1038/s41597-026-06751-0](https://doi.org/10.1038/s41597-026-06751-0)

Reed D.E., Dugan H.A., Flannery A.L. et al. 2018. Carbon sink and source dynamics of a eutrophic deep lake using multiple flux observations over multiple years. *Limnology and Oceanography Letters* 3(3): 285–292. DOI: [10.1002/lo2.10075](https://doi.org/10.1002/lo2.10075)

Rogora M., Cancellario T., Caroni R. et al. 2023. High-frequency monitoring through in-situ fluorometric sensors: a supporting tool to long-term ecological research on lakes. *Frontiers in Environmental Science* 10: 1058515. DOI: [10.3389/fenvs.2022.1058515](https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1058515)

Sander R. 2023. Compilation of Henry's law constants (version 5.0.0) for water as solvent. *Atmospheric Chemistry and Physics* 23(19): 10901–12440. DOI: [10.5194/acp-23-10901-2023](https://doi.org/10.5194/acp-23-10901-2023)

Santos I.R., Hatje V., Serrano O. et al. 2022. Carbon sequestration in aquatic ecosystems: recent advances and challenges. *Limnology and Oceanography* 67(S2): S1–S5. DOI: [10.1002/lno.12268](https://doi.org/10.1002/lno.12268)

Song C., Liu S., Wang G. et al. 2024. Inland water greenhouse gas emissions offset the terrestrial carbon sink in the northern cryosphere. *Science Advances* 10(39): eadp0024. DOI: [10.1126/sciadv.adp0024](https://doi.org/10.1126/sciadv.adp0024)

Spank U., Bernhofer C., Mauder M. et al. 2023. Contrasting temporal dynamics of methane and carbon dioxide emissions from a eutrophic reservoir detected by eddy covariance measurements. *Meteorologische Zeitschrift* 32(4): 317–342. DOI: [10.1127/metz/2023/1162](https://doi.org/10.1127/metz/2023/1162)

Vitale D., Fratini G., Helfter C. et al. 2024. A pre-whitening with block-bootstrap cross-correlation procedure for temporal alignment of data sampled by eddy covariance systems. *Environmental and Ecological Statistics* 31(2): 219–244. DOI: [10.1007/s10651-024-00615-9](https://doi.org/10.1007/s10651-024-00615-9)

Wang W., Sun X., Zhu X. et al. 2026. Contribution of lakes to global greenhouse gas emissions: mechanisms, quantification and mitigation strategies. *Journal of Environmental Management* 398: 128585. DOI: [10.1016/j.jenvman.2026.128585](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.128585)

Yong-An Z., He-Ru X. 2011. Online measurement solubility of CO_2 in water based on membrane covered optical sensor. *International Conference on Advanced Infocomm Technology* 2011: 30. DOI: [10.1049/cp.2011.1075](https://doi.org/10.1049/cp.2011.1075)

Yoon T.K., Jin H., Oh N.-H. et al. 2016. Technical note: Assessing gas equilibration systems for continuous pCO_2 measurements in inland waters. *Biogeosciences* 13(13): 3915–3930. DOI: [10.5194/bg-13-3915-2016](https://doi.org/10.5194/bg-13-3915-2016)

Zakharova O.V., Moskvina N.N., Glazkova A.V. et al. 2026. Carbon measurement supersites in Russia: using information technologies to track research trends (2014–2024). *Information Society* 1: 141–161. DOI: [10.52605/16059921_2026_01_141](https://doi.org/10.52605/16059921_2026_01_141)

Zhang H., Zhang Z., Zhao X. et al. 2026. Hydrodynamic control on the interannual variability of algal bloom in the Pearl River Estuary from 2021 to 2024: evidences from buoy data and hydrodynamic modeling. *Marine Pollution Bulletin* 226: 119320. DOI: [10.1016/j.marpolbul.2026.119320](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.119320)