

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 551.588.4; 551.510

**СУДОВАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКОВ
ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ CO₂ И CH₄ ВО ВНУТРИКОНТИНЕНТАЛЬНЫХ
ВОДАХ¹**

**© 2026 г. Г. А. Колотков*, А. В. Фофонов, М. Ю. Аршинов, Б. Д. Белан,
Д. А. Пестунов**

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева

Сибирского отделения Российской академии наук

Россия, 634055, Томск, пл. Академика Зуева, 1

**E-mail: kolotkov@iao.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2026

После доработки 25.05.2026

Принята к публикации 23.06.2026

Описана бортовая система сбора данных для судовой лаборатории, размещаемая на маломерном судне и предназначенная для исследования потоков парниковых газов CO₂, CH₄ и H₂O на границе раздела “пресная вода–атмосфера”. Подробно рассматриваются методы и подходы проведения измерений количественных процессов (эмиссия и поглощение) во внутренних континентальных водах. Использовался мобильный комплекс, оснащенный лазерным газоанализатором Picarro G4301 в режиме рециркуляции, плавучей камерой, защищенным ноутбуком, фильтрами и осушителем для повышения точности. Результаты пяти кампаний 2025 г. на реке Оби, в районе обсерватории “Фоновая” ИОА СО РАН показали, что судовая лаборатория удовлетворяет поставленным целям и задачам исследования. Она может быть прототипом перспективной мобильной лаборатории для применения в широкой области спектра наук об окружающей среде.

1. ВВЕДЕНИЕ

Крупнейшие реки Сибири составляют основную часть водных ресурсов России, а их пойменные комплексы, старицы и затоны работают в качестве как источников, так и стоков таких парниковых газов, как диоксид углерода (CO₂) и метан (CH₄). Оценки глобальных потоков CO₂ в речных системах варьируются от 1.9 до 2.2 ПгС·год⁻¹, а для CH₄ диапазон еще

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

больше – от 16.7 до 39.7 ТгС·год⁻¹ [1, 2]. Эти оценки подчеркивают значимую роль внутренних пресноводных объектов в глобальном биогеохимическом углеродном цикле, а их значительный разброс указывает на необходимость дополнительных исследований газообмена между речными системами и атмосферой. Анализ литературных источников [3–5] показал, что экспериментальные данные о потоках парниковых газов во внутриконтинентальных водных объектах Западной и Восточной Сибири крайне скудны. Более того, региональные оценки потоков диоксида углерода и метана существенно разнятся из-за использования различных методик измерений и невозможности проведения прямых измерений в труднодоступных местах. Например, используемый метод отбора проб воды, консервирование хлоридом ртути проб и последующий анализ в лаборатории методом газовой хроматографии, в том числе и расчетное моделирование потоков газов, представленные в работах [6, 7], являются трудоемкими и времязатратными.

Судовые лаборатории являются эффективным инструментом для исследования пространственных неоднородностей потоков парниковых газов на границе “вода–атмосфера”, рельефа и типа дна, температуры и других физико-химических параметров воды и приводной атмосферы. Более того, с помощью плавающей лаборатории можно исследовать среды в труднодоступных местах, где полностью отсутствуют другие средства наблюдения. В 2024 году на базе маломерного моторного судна “WellBoat-434” была создана многофункциональная судовая лаборатория, получившая название WellBoat-43-4 “FreshWater Carbon Flux-IAO” (FWCF-IAO). Судовая плавающая лаборатория создавалась Лабораторией климатологии атмосферного состава Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН. С начала мая 2025 года судовая лаборатория используется для измерения удельных потоков парниковых газов на границе раздела “пресная вода–атмосфера”.

Целями настоящей работы являлись разработка судовой лаборатории и ее апробирование в натуральных условиях на одной из крупнейших рек Сибири – Оби, в ее русловой и береговой зонах, в период открытой воды в режиме реального времени.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА (УСТРОЙСТВА)

Плавающая лаборатория WellBoat-43-4 “FWCF-IAO” реализует классический диффузионный метод измерения потоков CO₂ и CH₄ через водно-воздушную границу с помощью плавающей камеры, соединенной с высокоточным ИК-анализатором по схеме замкнутого контура. Измеряя с высокой точностью скорость изменения $p\text{CO}_2$ и $p\text{CH}_4$ во временно изолированном объеме камеры, можно непосредственно вычислить удельный поток газа с поверхности воды без знания концентрации в воде.

Рис.1. Судовая лаборатория для измерения удельных потоков парниковых газов на границе раздела “пресная вода – атмосфера” WellBoat-43-4 “FWCF-IAO” (а) и схематическая диаграмма измерительного комплекса (б).

Таблица 1. Технические характеристики оборудования судовой лаборатории WellBoat-434 “FWCF-IAO”

Прибор	Модель	Измеряемый параметр	Диапазон	Неопределенность
Газоанализатор	Picarro G4301	CO ₂ , млн ⁻¹ CH ₄ , млн ⁻¹	0–30000 0–800	Менее ±0.4 Менее ±0.003
Эхолот со сканирующим сонаром	Garmin STRIKER Vivid 5cv + ClearVü™	Скорость, км/ч Глубина, м Температура воды, °C	0–32 до 250 до 50	±0.1 ±0.1 ±0.1

Плавающая камера 6 образует над водой замкнутый газовый объем 0.064 м³, обеспечивая прямой контакт с водной поверхностью при минимальном проникновении атмосферного воздуха (рис. 1). Поток газа из воды приводит к росту его концентрации/парциального давления в этом объеме. Фильтры 9 из ПТФЭ и картридж 10 с Mg(ClO₄)_{2т} удаляют аэрозоль и водяной пар, предотвращая конденсацию и интерференцию по H₂O в CRDS-сигнале (Cavity Ring-Down Spectroscopy). Это особенно важно при высоких летних относительных влажностях над пресной водой. GPS/ГЛОНАСС-приемник 2, сонар 3 и эхолот 7 обеспечивают синхронную привязку измеренных потоков к координатам и глубине, что необходимо для построения пространственных карт эмиссий с учетом морфометрии (изменения глубины, рельефа дна, зон мелководья). Высокая точность G4301 (относительная погрешность менее 0.1% при типичных уровнях CO₂ и CH₄) позволяет уверенно регистрировать изменения парциального давления на уровне нескольких ppm за минуты, что при типичных объемах камеры дает пределы обнаружения потоков порядка единиц ммоль·м⁻²·сут⁻¹ и ниже, достаточные для большинства рек и озер умеренных/бореальных широт.

Плавающая лаборатория позволяет разместить оборудование и принять на борт трех операторов: первый управляет лодкой и следит за безопасностью проведения работ, второй (в носу лодки) опускает и поднимает камеру, третий следит за процессом измерений и отдает команды второму. Лодка также оснащена складным тентом, закрывающим внутреннее пространство со всех сторон, что позволяет проводить измерения при наличии осадков. Транспортировка лодки к объектам исследований осуществляется на прицепе МЗСА 81771Е.

3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Потоки CO₂ и CH₄ измерялись в 2025 году на Верхней Оби в районе обсерватории “Фоновая” ИОА СО РАН (56.4185° с.ш.; 84.0740° в.д.) с помощью мобильного камерного комплекса. В состав измерительного узла (рис. 1) входит камера кубической формы с длиной

границы 40 см, что соответствует объему 64 л. Стенки камеры изготовлены из оргстекла, химически инертного по отношению к исследуемым газам; наружная поверхность имеет светоотражающее покрытие для создания внутри объема затемненных условий. Прозрачные же стенки камеры пропускают солнечное излучение, что вследствие поглощения приводит к ее нагреву и росту внутреннего давления, что в свою очередь усиливает газообмен на границе “вода–атмосфера”. Камера монтируется на квадратном поплавке из пеноплекса таким образом, что ее нижний край погружается в воду на глубину порядка 2 см. Для предотвращения стратификации воздушной массы внутри камеры используется малогабаритный вентилятор, который создает направленный воздушный поток, ориентированный на боковую стенку камеры под углом 65°.

В состав научного аппаратного комплекса входит лазерный газоанализатор Picarro G4301, который обеспечивает высокоточное непрерывное измерение объемных концентраций углекислого газа и метана с частотой 1 Гц. Среднеквадратичная погрешность измерений составляет порядка 0.4 млн^{-1} для CO_2 и 3 млрд^{-1} для CH_4 [8]. Функционирование прибора основано на применении метода спектроскопии внутрирезонаторного затухания (CRDS), при котором регистрируется время затухания лазерного импульса в высокодобротном оптическом резонаторе, и по его изменению вычисляется поглощение излучения молекулами целевых газов [9]. Такой подход обеспечивает высокую чувствительность и селективность к отдельным спектральным линиям CO_2 и CH_4 , что делает газоанализатор применимым для детальных исследований парниковых газов во внутриконтинентальных водах, расположенных в средних и высоких широтах, с низкими фоновыми концентрациями и существенной кратковременной вариабельностью потоков.

В ходе натурных экспериментов Picarro G4301 эксплуатируется в режиме замкнутой циркуляции, реализуемой встроенным вакуумным насосом и контуром полиэтиленовых трубопроводов, соединяющих “входные” и “выходные” порты анализатора с плавучей камерой (см. рис. 1). В линию отбора интегрированы аэрозольные фильтры и химический осушитель, что препятствует загрязнению оптического резонатора и снижает влияние водяного пара на точность определения концентраций CO_2 и CH_4 . Управление газоанализатором, а также сбор и логирование данных осуществляются с помощью ноутбука по протоколу удаленного доступа через приложение “Удаленный рабочий стол”.

Максимальная скорость дрейфа судовой лаборатории за весь период измерений составила 4.3 м/с, глубина Оби варьировалась от 0.4 до 4.3 м, а температура воды – от 17.3 до 21.1 °С. Измерения упомянутых выше характеристик водного потока проводились с использованием эхолота Garmin STRIKER Vivid 5cv со сканирующим сонаром Garmin ClearVü™.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Удельные потоки CO_2 и CH_4 рассчитываются в рабочей среде RStudio (программный пакет FluxCalR) методом линейной регрессии. Для надежности в каждом измерительном цикле анализируются интервалы по 2–5 мин. Итоговое значение выбирается по максимальному R^2 . Такая методика позволяет минимизировать ошибки при оценке газообмена на границе раздела сред [10, 11].

Рис. 2. Медианные значения удельных потоков диоксида углерода и метана для каждой серии измерений и уровней температуры и воды в период полевых измерений 2025 году.

На рис. 2 представлены медианные удельные потоки CO_2 и CH_4 , полученные в ходе пяти измерительных кампаний полевого сезона 2025 г., выполненных с использованием плавающей камеры в режиме свободного дрейфа (первая дата) и якорной стоянки (вторая дата). По оси абсцисс отложены даты наблюдений в период с конца мая по начало сентября, по левым осям ординат – удельные потоки CO_2 и CH_4 ($\text{мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$), по правым – температурный режим воды и уровень воды в реке. Столбцы с диагональной штриховкой отражают медианные значения потока CH_4 , столбцы со штриховкой по вертикали – медианные значения потока CO_2 . Дополнительно пунктирная и штриховая кривые иллюстрируют сопутствующую сезонную динамику температуры воды и уровня воды, позволяя сопоставить газообмен с гидрологическими и термическими условиями водотока.

В течение сезона экосистема стабильно выступает источником CH_4 , при этом максимальные потоки наблюдаются в конце половодья (30.05–27.06) при теплой воде и повышенном уровне, обеспечивающем приток органики. По мере снижения уровня и стабилизации стока эмиссия CH_4 уменьшается, но остается положительной, указывая на сохраняющийся метаногенез в донных отложениях. В августе поток CH_4 вновь возрастает из-за прогрева воды и поступления свежей органики из разлагающейся растительности в конце сезона. В начале сентября эмиссия ослабевает. Потоки CO_2 становятся заметно отрицательными при низком уровне воды и максимальной температуре, что характерно для мелководных участков с развитой растительностью; к сентябрю они близки к нулю, отражая ослабление продукционной активности при сохраняющемся дыхании.

Сравнение режимов дрейфа и якорной стоянки показывает, что медианные значения потоков, усредненные по отдельным кампаниям, хорошо согласуются между собой, что свидетельствует об отсутствии систематического смещения, связанного с методом установки камер. Это позволяет рассматривать оба режима как взаимодополняющие. Наблюдаемая структура сезонной динамики – максимумы CH_4 в теплый и гидрологически активный период, перемещение системы от источника к временной “раковине” по CO_2 в середине лета –

согласуется с современными представлениями о функционировании малых и средних бореальных и арктических рек, в которых метаногенез локализован в анаэробных микроразонах и слабо чувствителен к кратковременным изменениям стока, тогда как баланс CO_2 определяется конкуренцией между автотрофной продукцией и гетеротрофной минерализацией органического вещества [7, 12].

5. ОБСУЖДЕНИЕ

По характеру речной сети, условиям питания и формирования водного режима река Обь делится на 3 участка: верхний (до устья реки Томь), средний (до устья реки Иртыш) и нижний (до Обской губы). Наиболее исследованными, хотя и на ограниченных участках главного русла, являются средний и нижний участки Оби.

Таблица 2. Сопоставление потоков с результатами исследований других авторов

Участок Оби	Поток CO_2 , $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$	Поток CH_4 , $\text{гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$
Верхнее течение (наши данные)	$-0.22 \div -0.03$	0.004–0.022
Среднее течение (русло) [17, 22]	0.03–0.6	0.01–0.09
Притоки средней Оби [19, 23]	0.4–5	0.001–0.04
Нижнее течение [20, 24]	1.56–12	Менее 0.001–0.005

В безмерзлотной зоне верхнего течения Оби на протяжении всего времени полевых исследований наблюдается стабильный сток CO_2 от -80 до $-10 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, что соответствует $-0.22 \div -0.03 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$, а эмиссия CH_4 составляет от 0.2 до $1.2 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ч}^{-1}$, что соответствует $0.004\text{--}0.022 \text{ гС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. В теплый период года водная биота значительно потребляет растворенный неорганический углерод, из-за чего парциальное давление $p\text{CO}_2$ становится меньше атмосферного, и происходит сток углерода. Данное явление описано для прибрежной литорали Байкала [14] и арктических рек в конце лета и начале осени [15].

Для потоков CO_2 в среднем и нижнем течениях Оби картина диаметрально противоположная: Обь является источником диоксида углерода. Это обусловлено массовым выносом растворенного органического вещества из Васюганских болот [16, 17], в том числе древнего органического вещества вследствие деградации многолетней мерзлоты [18]. Полученные значения потоков метана практически полностью совпадают с результатами для средней Оби, но для нижнего течения потоки CH_4 практически отсутствуют, составляя от 0.5% до 1% от суммарной эмиссии [19, 20]. Это связано со снижением температуры воды,

ростом концентрации кислорода и высокой интенсивностью процессов микробного окисления метана до CO₂ во внутриконтинентальных водах перед выносом в эстуарии [21].

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью разработанного мобильного камерного комплекса в составе судовой лаборатории WellBoat-43-4 “FWCF-IAO” проведено измерение удельных потоков CO₂ и CH₄ в режиме реального времени на границе раздела “вода–атмосфера” на реке Оби. В результате пяти кампаний 2025 г. показано, что исследуемая речная система в течение сезона открытой воды является устойчивым источником CH₄ и более динамичным поглотителем CO₂, что необходимо учитывать при оценке суммарного парникового эффекта и при экстраполяции локальных измерений на масштаб/площадь водосбора.

Численные оценки, основанные на опубликованных применениях плавающих камер в тропических и бореальных водоемах, показывают диапазон диффузионных потоков CO₂ порядка 50–3000 ммоль·м⁻²·сут⁻¹ и CH₄ порядка 1–500 ммоль·м⁻²·сут⁻¹; чувствительность мобильного комплекса с Picarro G4301 позволяет устойчиво измерять нижнюю треть этого диапазона для CO₂ и значительную часть для CH₄ при экспозициях 3–10 мин [13, 25].

Таким образом, судовая плавающая лаборатория WellBoat-43-4 “FWCF-IAO” реализует физически строгий диффузионный подход к измерению удельных потоков CO₂ и CH₄ на границе “пресная вода–атмосфера”, обеспечивая высокую метрологическую точность, пространственную детализированность и формальную сопоставимость с существующими моделями газообмена.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rocher-Ros G., Stanley E., Loken L. et al. Nature. 2023. V. 621. P. 530. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06344-6>.
2. Drake T.W., Raymond P.A., Spencer R.G.M. Limnol. Oceanogr. Lett: 2018. V. 3. P. 132. <https://doi.org/10.1002/lol2.10055>.
3. Xi, X., Zhuang, Q., Kim, S., Zhang, Z. J. Geophys. Res. Biogeosci. 2023. V. 128. P. e2023JG007466. <https://doi.org/10.1029/2023JG007466>
4. Castro-Morales K., Canning A., Körtzinger A., Göckede M., Küsel K., Overholt W.A., Wichard T., Redlich S., Arzberger S., Kolle O., Zimov N. J. Geophys. Res. Biogeosci. 2022. V. 127. P. e2021JG006485. <https://doi.org/10.1029/2021JG006485>

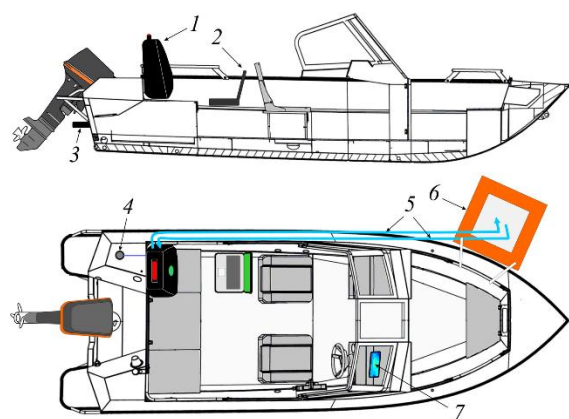
5. *Striegl, R.G., Dornblaser M.M., McDonald C.P., Rover J.R., Stets E.G.* Glob. Biogeochem. Cycles. 2012. V. 26. P. GB0E05. <https://doi.org/10.1029/2012GB004306>
6. *Пунко И.И., Пузач С.П., Савичев О.Г. и др.* Доклады Академии наук. 2019. Т. 484. № 6. С. 691. <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846691-697>
7. *Jones S.F., Duke P.J., Manning C.C.M., Alexander A., Gonski S.F., Else B.G.T.* Sci. Total Environ. 2025. V. 1002. P. 180556. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180556>
8. *Аришинов М. Ю., Белан Б. Д., Давыдов Д. К., Козлов А. В., Фофонов А. В., Аришинова В. Г.* Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33. С. 544. <https://doi.org/10.15372/AOO20200707>
9. *Васильченко С.С., Kassi S., Луговской А.А.* Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. С. 68. <https://doi.org/10.15372/AOO20210109>
10. *Zhao J. J.* Open Source Software. 2019. V. 4. P. 1751. <https://doi.org/10.21105/joss.01751>
11. *Maier M., Weber T.K.D., Fiedler J. et al.* J. Plant Nutr. Soil Sci. 2022. V. 185. P. 447. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200199>
12. *Krickov I.V., Lim A.G., Shirokova L.S., Korets M.A., Pokrovsky O.S.* Sci. Total Environ. 2024. V. 936. P. 173491. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173491>
13. *Paranaíba J.R., Barros N., Mendonça R., Linkhorst A., Isidorova A., Roland F., Almeida R.M., Sobek S.* Environ Sci. Technol. 2018. V. 52. P. 607. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05138>.
14. *Пестунов, Д.А., Домышева, В.М., Шамрин, А.М., Сакирко, М.В., Панченко, М.В.* Фундам. и прикл. климатол. 2024. Т. 10. № 3. С. 399. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=75169417>
15. *Jones S.F., Duke P.J., Manning C.C.M., Alexander A., Gonski S.F., Else B.G.T.* Sci. Total Environ. 2025. V. 1002. P. 180556. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180556>
16. *Харанжевская Ю.А., Раудина Т.В., Истигечев Г.И., Курашев Д.Г., Бебишев А.И.* Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2026. Т. 337. № 3. С. 178. <http://doi.org/10.18799/24131830/2026/3/5171>
17. *Vorobyev S.N., Kolesnichenko L.G., Kolesnichenko Y., Prokushkin A.S. et al.* J. Hydrol. 2024. V. 638. P. 131468. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131468>
18. *Virkkala A.M., Rogers B.M., Watts J.D. et al.* Nat. Clim. Chang. 2025. V. 15. P. 188. <https://doi.org/10.1038/s41558-024-02234-5>
19. *Krickov I.V., Lim A.G., Shirokova L.S., Korets M.A., Karlsson J., Pokrovsky O.S.* Sci. Total Environ. 2023. V. 859. P. 160202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160202>
20. *Vorobyev S.N., Kolesnichenko Y., Karlsson J., Pokrovsky O.S.* Sci. Total Environ. 2024. V. 954. P. 176294. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176294>
21. *Castro-Morales K., Canning A., Arzberger S. et al.* Biogeosciences. 2022. V. 19. P. 5059. <https://doi.org/10.5194/bg-19-5059-2022>

22. *Krickov I.V., Serikova S., Pokrovsky O.S., Vorobyev S.N., Lim A.G., Siewert M.B., Karlsson J.* Ecol. Indic. 2021. V. 131. P. 108164. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108164>
23. *Lim A.G., Krickov I.V., Vorobyev S.N., et al.* Biogeosciences. 2022. V. 19. P. 5859. <https://doi.org/10.5194/bg-19-5859-2022>
24. *Serikova S., Pokrovsky O. S., Ala-Aho P. et al.* Nat. Geosci. 2018. V. 11. P. 825. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0218-1>
25. *Xiao S., Wang C., Wilkinson R. J. et al.* Atmos. Environ. 2016. V. 137. P. 45. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.04.036>

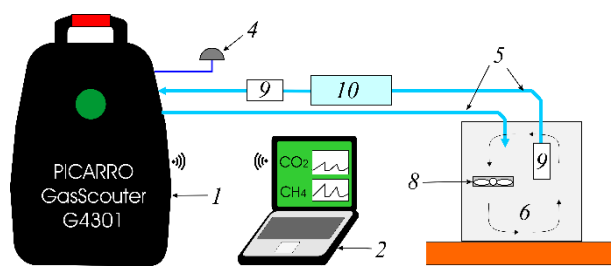
ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Судовая лаборатория для измерения удельных потоков парниковых газов на границе раздела “пресная вода – атмосфера” WellBoat-43-4 “FWCF-IAO” (а) и схематическая диаграмма измерительного комплекса (б): 1 – газоанализатор CO₂/CH₄/H₂O (Picarro G4301), 2 – защищенный ноутбук (Panasonic CF-31), 3 – сканирующий сонар (Garmin ClearVu), 4 – GPS/GLONASS-приемник (BU-353), 5 – подводная и отводящая полиэтиленовые трубки (Dayco 44-PE-1/4-NSF), 6 – плавучая камера, 7 – эхолот (Garmin STRIKER Vivid 5cv), 8 – вентилятор, 9 – политетрафторэтиленовые мембранные фильтры, 10 – картридж с химическим осушителем (Mg(ClO₄)₂).

Рис. 2. Медианные значения удельных потоков диоксида углерода и метана для каждой серии измерений и уровней температуры и воды в период полевых измерений 2025 году.



(a)



(б)

Рис. 1.

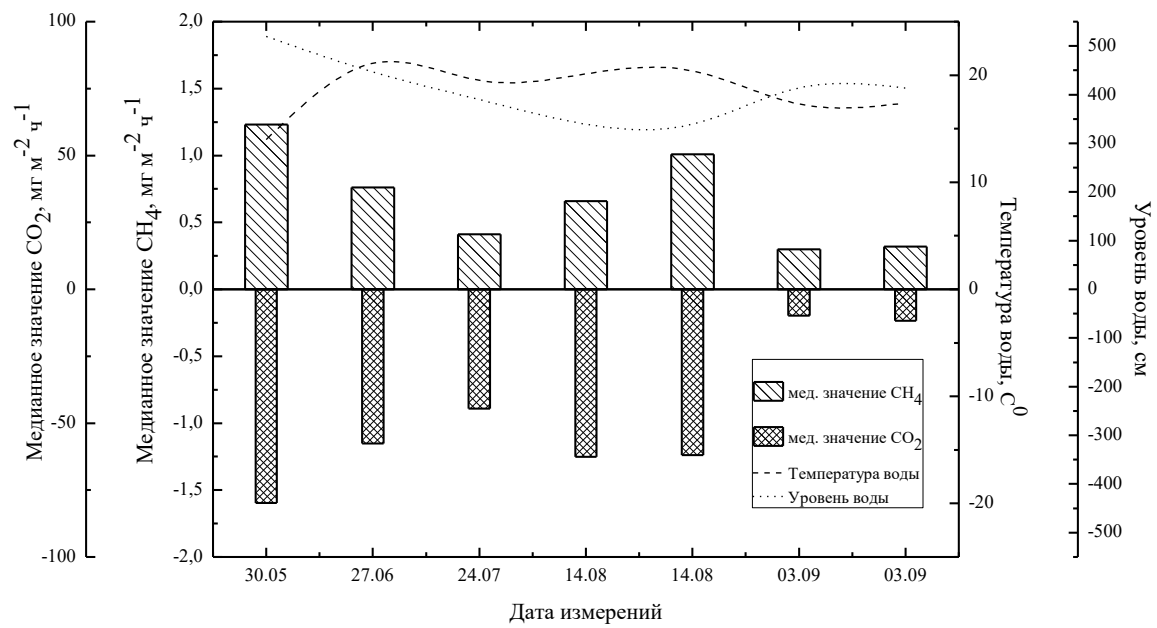


Рис.2.